



INSPE Académie de Limoges
Métiers de l'enseignement, de l'éducation et de la formation
Master MEEF Sciences Physique-Chimie
Physique-Chimie

2023/2025

Enseignement de la Physique :
Les concepts d'espace et de temps en Physique

Nina MUNOZ

Mémoire encadré par

Bruno Lucas

Maître de Conférences, Université de Limoges



Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mon référent de mémoire, Bruno Lucas, pour son accompagnement, ses conseils précieux et son soutien tout au long de cette recherche. Je souhaite également remercier Jérôme Fatet, qui, en tant que relecteur, m'a aidé à affiner mon axe de recherche tout au long des différents séminaires. Leurs remarques et leur regard critique ont été d'une aide précieuse dans l'élaboration et la structuration de mon travail, ce qui m'a permis d'avancer avec rigueur et confiance dans mon travail.

Je remercie également mes tuteurs de terrain, dont l'aide et les conseils ont été essentiels. Grâce à eux, j'ai pu mener à bien mes expérimentations en classe et affiner ma réflexion pédagogique, notamment en termes de remédiation. Leur disponibilité et leur soutien m'ont été d'une grande aide tout au long de ce projet.

Enfin, je souhaite remercier mes élèves de 3e, qui ont accepté de participer à cette séquence avec enthousiasme et sérieux. Leur engagement et leur curiosité ont grandement enrichi cette expérience et donné tout son sens à mon travail.

À toutes ces personnes, je témoigne ma sincère reconnaissance.

Droits d'auteurs

Cette création est mise à disposition selon le Contrat :

« **Attribution-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de modification 3.0 France** »

disponible en ligne : <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>



Table des matières

Introduction	6
1. L'essence des concepts d'espace et de temps.....	9
1.1. L'évolution des concepts.....	9
1.2. Définition par le mouvement.....	11
1.3. Définition par la dimension.....	13
2. Les conceptions initiales : enjeu et analyse.....	15
2.1. Les conceptions initiales.....	15
2.1.1. Définition.....	15
2.1.2. L'enjeu de la déconstruction.....	16
2.2. Analyse de quelques conceptions initiales.....	17
2.2.1. La séparation entre l'infiniment grand et l'infiniment petit.....	18
2.2.2. L'analogie force-vitesse.....	19
2.2.2.1. Sans force, il ne peut y avoir de mouvement.....	19
2.2.2.2. L'adhérence force-vitesse.....	20
2.2.3. L'origine d'une force.....	22
3. Stratégies d'enseignement.....	23
3.1. L'histoire des sciences.....	23
3.2. Les évaluations diagnostique et formative.....	23
3.3. La tâche complexe.....	24
4. Elaboration de la séquence pédagogique proposée.....	26
4.1. Contexte de l'expérience.....	26
4.2. Contexte de la séquence.....	26
4.3. Séquence pédagogique.....	28
4.3.1. Plan de la séquence.....	28
4.3.2. Evaluation diagnostique.....	28
4.3.3. Première activité d'histoire des sciences.....	29
4.3.4. Deuxième activité d'histoire des sciences.....	34
4.3.5. Activité expérimentale.....	37
4.3.6. Support de cours.....	38
4.3.7. Evaluation formative : tâche complexe.....	40
4.3.8. Evaluation sommative.....	41
5. Analyse a posteriori.....	44
5.1. Evaluation diagnostique.....	44
5.2. Activité 2 : De la chute des corps au mouvement des planètes.....	49
5.3. Activité 3 : L'interaction gravitationnelle.....	51
5.4. Activité expérimentale.....	52
5.5. Séance de cours.....	54
5.6. Evaluation formative.....	54
5.7. Evaluation sommative.....	55
Conclusion	58
Références bibliographiques	60
Annexes	63

Table des illustrations

Figure 1 : Extrait du bulletin officiel de l'éducation nationale, cycle 4, 2020	27
Figure 2 : tableau d'évaluation des compétences.	43

Introduction

« Qu'est-ce que le temps ? Si personne ne me pose la question, je sais ; si quelqu'un pose la question, et que je veuille l'expliquer, je ne sais plus. » (Saint Augustin, 354-430). Les concepts d'espace et de temps sont depuis toujours à l'origine de nombreux questionnements. Qu'il s'agisse de sciences ou de philosophie, ces notions sont au cœur de la compréhension des phénomènes du réel. Dans le cadre de l'enseignement des sciences, et plus particulièrement de la physique, les concepts d'espace et de temps constituent le berceau de l'apprentissage de cette discipline. Ils représentent le fondement de la construction de la connaissance scientifique.

La quête d'une définition pour ces notions remonte à l'Antiquité. Nombreux scientifiques ont entrepris d'énoncer le sens de ces termes. Aujourd'hui encore, il n'existe aucune définition unique et universelle de ces concepts qui soit acceptée par l'ensemble de la communauté scientifique. En effet, le contexte dans lequel nous utilisons ces notions détermine le sens que nous choisissons de leur donner. Or, l'une des missions de l'enseignant de physique-chimie est bien de transmettre l'essence de ces notions abstraites afin d'établir les principes qui en découlent. Dans cet objectif, il semble nécessaire de se rapporter à des aspects simples et manifestes sans compromettre l'exactitude des concepts.

Étant données les difficultés qu'éprouve notre esprit à appréhender ces concepts, nous nous dressons une définition personnelle de l'espace et du temps. Or, dans cette recherche de simplicité, les élèves se construisent parfois des représentations inexactes, fonctionnant dans leur quotidien mais représentant des obstacles à l'apprentissage de la physique. De fait, ce phénomène est bien observable en mécanique, champ de la physique reliant l'espace et le temps au travers de l'étude du mouvement. Les conceptions initiales des élèves sur le fondement même de la notion de mouvement entraînent des intuitions erronées et des difficultés à maîtriser la logique inhérente à la mécanique. En classe, nous observons fréquemment une conception profondément ancrée chez les élèves : une nette distinction entre les phénomènes terrestres et ceux qui se produisent au-delà du système Terre. Cette vision s'accompagne d'une tendance à restreindre leur compréhension du monde à ce qui leur est directement observable sur Terre, divisant ainsi la réalité en deux univers distincts : la Terre et « le reste ».

En effet, j'ai pu observer cette conception, au cours d'un stage réalisé en établissement scolaire, dans le cadre d'un cours de terminale spécialité appartenant au chapitre « mouvement dans un champ ». Les élèves ont tout d'abord résolu un exercice sur le mouvement d'un objet soumis au champ de pesanteur terrestre en appliquant le principe fondamental de la dynamique. Or, face à deux exercices similaires, l'un portant sur le

mouvement d'un objet dans le champ gravitationnel de Mars et l'autre sur le déplacement d'un électron dans un champ électrique, ces élèves ont estimé que la seconde loi de Newton n'était plus applicable. Cela révèle une persistance d'une distinction perçue entre les forces agissant dans le cadre du « monde tangible » pour les élèves et celles présentes dans l'espace ou du moins liées à des dimensions de l'Univers qui échappent à leur perception directe. Il y a donc une conception non-unifiée des lois de la mécanique entre la Terre et l'Univers. Pour surmonter cette conception fragmentée, il est essentiel de consolider la compréhension de l'universalité des lois de la mécanique classique avant d'aborder la mécanique quantique ou relativiste, en insistant notamment sur la loi de la gravitation universelle de Newton.

Le rôle de l'enseignant est de déceler les conceptions initiales des élèves et de les déconstruire afin d'avorter toute embûche dans le processus d'apprentissage. A la lumière de ces éléments, nous pouvons nous interroger sur la problématique suivante :

« Quelles stratégies pédagogiques peuvent être mises en œuvre pour déconstruire les conceptions initiales des élèves et les amener à comprendre l'universalité des lois de la mécanique classique à travers l'étude de la loi de la gravitation universelle ? »

Cette étude vise à déconstruire les conceptions initiales des élèves concernant les notions d'espace, de temps et de mouvement, qui constituent des prérequis fondamentaux pour la compréhension des principes de la mécanique. Ces représentations intuitives façonnées par l'expérience quotidienne peuvent entrer en contradiction avec les modèles scientifiques établis.

Dans un premier temps, nous nous intéresserons à l'évolution historique des notions d'espace et de temps, qui ont été au cœur des réflexions scientifiques depuis l'Antiquité. En explorant les différentes théories élaborées au fil des siècles, nous chercherons à extraire une formulation conceptuelle adaptée à l'enseignement de la mécanique, permettant aux élèves de s'approprier ces notions de manière rigoureuse et cohérente.

Nous analyserons ensuite les conceptions initiales des élèves relatives à la force d'interaction gravitationnelle, en identifiant les obstacles qui entravent son assimilation.

Dans un troisième temps, nous proposerons des méthodes pédagogiques spécifiques visant à déconstruire ces conceptions erronées. Ces approches didactiques s'appuieront sur des expérimentations, des mises en situation et des analogies permettant d'amener progressivement les élèves à réviser leurs représentations initiales.

Nous élaborerons ensuite une séquence pédagogique intégrant ces méthodes d'enseignement, dont l'objectif principal sera de clarifier la notion d'interaction gravitationnelle et d'en poser les fondements pour la poursuite de l'apprentissage en mécanique.

Enfin, après la mise en œuvre de cette séquence auprès d'une classe de 3e, nous procéderons à une analyse a posteriori de son efficacité. Cette évaluation nous permettra d'identifier les réussites, les difficultés rencontrées et les ajustements nécessaires pour améliorer l'approche didactique adoptée.

L'objectif final de ce mémoire est donc de concevoir, expérimenter et analyser cette séquence pédagogique, tout en engageant une réflexion approfondie sur la pratique enseignante. En s'appuyant sur les résultats obtenus, cette étude proposera des pistes de remédiation pour optimiser la séquence et favoriser une meilleure assimilation des concepts scientifiques par les élèves.

1. L'essence des concepts d'espace et de temps.

L'objet de cette partie est de parcourir l'évolution de la pensée scientifique sur les concepts d'espace et de temps afin d'en extraire les éléments nécessaires à l'élaboration d'une définition. L'enjeu n'est donc pas de prétendre pouvoir donner une définition universelle de ces concepts mais simplement de pouvoir apporter assez d'éléments significatifs aux élèves pour aborder la physique.

1.1. L'évolution des concepts.

Bien que l'espace et le temps soient deux notions omniprésentes en science et en philosophie, apporter une description de ces concepts est un travail subtil. « *L'espace et le temps sont des concepts abstraits constitués à partir de l'expérience des sens et de celle du raisonnement scientifique.* »¹. En effet, la définition de l'espace ou celle du temps sera différente si nous posons la question à un mathématicien, un philosophe ou un physicien, mais elle dépend également du contexte historique dans lequel nous nous positionnons. Dans le cadre de l'enseignement de la physique, le professeur doit être capable de clarifier ces notions abstraites, perçues par la pensée, mais devant correspondre au réel. La définition qui en découle doit être accessible aux élèves et la plus générale possible sans en trahir le fond.

Les concepts d'espace et de temps ont évolué au fil des siècles et, notamment, le lien entre les deux. Le fait que l'espace et le temps soient fondamentalement liés relève encore aujourd'hui du débat. Cependant, l'idée n'était pas sérieusement envisagée avant Einstein. Si nous remontons à l'Antiquité, l'espace et le temps sont deux notions bien distinctes. Notons que pour Aristote¹, « l'espace » et « les corps » sont séparés. C'est par ailleurs une idée que nous retrouvons fréquemment chez les élèves. Un corps compte alors trois dimensions et il en va de même pour son mouvement. Le temps, pourtant inhérent au mouvement, n'apparaît pas comme variable du mouvement pour Aristote mais comme un nombre : « le temps est le nombre du mouvement, selon l'antérieur et le postérieur »². S. Hawking³ nous explique que selon Aristote, le corps est naturellement immobile tant qu'il n'est pas soumis à l'action d'une force générant son mouvement, « *il s'en suivait qu'un corps lourd devait tomber plus vite qu'un*

¹ Paty M. Les trois dimensions de l'espace et les quatre dimensions de l'espace-temps. Flament, HAL CCSD, p. 87-112, 1998.

² Bernard Guy. Eléments d'histoire des concepts d'espace et de temps : la place du mouvement, les glissements de sens. 2021. fahal-03442268f

³ Hawking SW. Une brève histoire du temps [Texte imprimé] : du Big Bang aux trous noirs. Flammarion ; 1989. (Souriau I. Nouvelle bibliothèque scientifique).

corps léger, parce qu'il subissait une plus grande attirance vers la Terre. ». Ce n'est que 19 siècles plus tard que Galilée corrige cette affirmation en expérimentant sur la chute des corps et affirmant que la vitesse de chute est identique pour deux corps de poids différents, si tant est que les corps aient la même forme et la même taille.

Nous en venons ainsi à Newton qui en 1687 dévoile ses deux premières lois dans « Principia Mathematica » basées en partie sur les travaux de Galilée. D'une part, le principe fondamental de la dynamique énonce que les forces auxquelles est soumis un corps n'ont pas pour effet de le mettre en mouvement comme le pensait Aristote mais plutôt de modifier sa vitesse. D'autre part, le principe d'inertie énonce qu'un corps qui n'est soumis à aucune force « *continue de se déplacer en ligne droite à la même vitesse* ». Ainsi, l'immobilité devient un cas particulier de mouvement rectiligne uniforme dont la vitesse est nulle.

Newton instaure alors les concepts d'espace et de temps absolus⁴ : « *le temps et l'espace absolus constituent comme deux cadres, à la fois immuables et sans limites, à l'intérieur desquels se jouent les phénomènes naturels, et notamment les mouvements des astres célestes soumis aux forces de la gravitation universelle.* ». Cependant, pour Newton, il n'y aurait aucune raison apparente de relier les notions d'espace et de temps au sein d'un même cadre, ni de les considérer comme intrinsèques aux phénomènes naturels.

Einstein, quant à lui, vient s'opposer en 1905 à l'idée de Newton du temps et de l'espace absolu en élaborant la théorie de la relativité restreinte. Einstein expose alors le concept d'espace-temps absolu, jonction de l'espace et du temps en un même cadre⁴ quadridimensionnel. Au sein de ce cadre, les mesures de distances et de durées sont relatives au référentiel choisi. Une seule grandeur est absolue et constante : la vitesse de la lumière.

Dix ans plus tard, Einstein généralise sa théorie en prenant en compte les phénomènes liés à la gravitation. Pour cela, il introduit le « *principe d'équivalence* » selon lequel : « *Des expériences locales et momentanées - c'est-à-dire limitées au voisinage immédiat d'un événement E - ne permettent pas de distinguer entre des forces de gravitation et des forces d'inertie (énoncé d'Einstein)* ». Il s'ensuit que le phénomène de gravitation est inhérent à un corps de masse quelconque et agit sur l'espace-temps en provoquant sa déformation. Réciproquement, toute déformation de l'espace-temps agit sur le corps.

⁴ Rivier D, Brunner F. L'espace et le temps de la physique contemporaine. Dialectica. 1 janv 1993;47(2/3):269-85.

Aujourd'hui, de nouvelles questions s'ouvrent aux physiciens avec l'expansion de la physique quantique. Ce champ de la physique, s'intéressant à l'infiniment petit, introduit la notion de champ de quanta : fusion de la particule et de l'onde. En vertu du principe d'incertitude d'Heisenberg, la non-séparabilité de l'espace-temps et le cadre vide de l'espace-temps, distinct de son univers physique, sont remis en question. En d'autres termes, il n'y a plus de différence entre le contenant et le contenu : « *l'application des principes de la physique quantique à la Relativité entraîne l'existence d'une interaction entre le cadre de l'espace-temps vide et l'univers physique.* »⁵.

L'enjeu pour la cosmologie actuelle est donc de relier la théorie de la relativité générale et celle de la physique quantique en un nouveau champ de pensée, une théorie unifiée applicable tant au macrocosme qu'au microcosme.

Nous venons de voir qu'au fil du temps, les théories d'espace et de temps se sont opposées les unes aux autres et ont ainsi évoluées en se complétant, se contredisant. Comme nous l'avons dit plus haut, aucun scientifique n'a abouti à une définition universelle de ces concepts. Pour autant, nous pouvons étudier les différentes manières d'aborder ces concepts afin d'en extraire les éléments essentiels.

1.2. Définition par le mouvement.

L'espace et le temps, liés par la mécanique peuvent aussi être définis à partir de la notion de mouvement. C'est d'ailleurs l'approche qui semble la plus pertinente aux vues de l'enseignement de la physique et de la mécanique en particulier. Nous considérons alors le mouvement, objet de la dynamique, comme un corps à quatre dimensions : trois dimensions d'espace et une dimension de temps. Selon Bernard Guy⁶, il n'est pas possible de penser les concepts d'espace et de temps de façon séparée. Du moins, cela pose un réel problème par rapport à la réalité du monde qui « ne colle aucune étiquette à ce qui est espace ou à ce qui est temps » : l'ensemble nous apparaît comme le monde. Or, notre esprit est incapable de penser en plus de trois dimensions. En citant Bergson, Bernard Guy nous dit : « l'esprit est mal à l'aise devant le mouvement, il a besoin de l'arrêter, de le fixer, de le rendre ponctuel, avec les contradictions qui s'ensuivent. ». C'est ainsi que dans le cadre scolaire nous apprenons à décrire un mouvement en fixant le temps pour observer les coordonnées d'espace. L'inverse est également envisageable, nous pouvons fixer les coordonnées

⁵ Rivier D, Brunner F. L'espace et le temps de la physique contemporaine. *Dialectica*. 1 janv 1993;47(2/3):269-85.

⁶ Guy B. Les rapports entre les concepts d'espace, de temps et de mouvement doivent être repensés. Conséquences en physique (relativité). Discussion préliminaire. 2006, HAL CCSD

spatiales et observer le temps. Ces deux processus sont utilisés dans l'étude des phénomènes ondulatoires par exemple.

En somme ici, l'espace et le temps ne constituent pas des entités différenciées mais appartiennent à l'ensemble « mouvement », seul élément perceptible pour l'Homme. Ce constat est renforcé par les sciences cognitives qui démontrent que « *l'espace et le temps ne correspondent pas à des qualités séparées à l'avance de la réalité. On ne perçoit que des phénomènes, des événements, des informations, non l'espace et le temps. [...] On ne perçoit que ce qu'elles (les sciences cognitives) appellent des mouvements.* »⁵.

Nous avons avancé l'idée que le mouvement était un corps à quatre dimensions. Nous pouvons apporter un élément supplémentaire à cette définition du mouvement qui vient, en conséquence, compléter la définition de l'espace et du temps. En effet, si nous observons les bulletins officiels des cycles 3⁷ et 4⁸ (Annexe 1), la description du mouvement est basée sur celle de la trajectoire et de la vitesse. A la trajectoire, ensemble des positions (3 coordonnées spatiales) successives occupées au cours du temps (1 dimension) par l'objet, nous ajoutons la vitesse pour décrire le mouvement et plus particulièrement l'évolution de la vitesse au cours du temps. La fameuse relation $v = \frac{d}{t}$ nous présente la vitesse comme le lien entre l'espace et le temps. Aussi, d'après B. Guy nous considérons que le mouvement est défini à partir d'un mouvement « *standard* »⁶ dont une fraction représente l'« *étalon d'espace ou de façon équivalente de temps* ». La vitesse de ce mouvement standard devenant ainsi une unité de mesure du mouvement quelconque. Nous prenons comme référentiel du mouvement celui de la lumière. Tout mouvement peut ainsi être défini par sa vitesse, soit le « *le ratio de deux portions de mouvement* », la référence étant le mouvement de la lumière.

Nous pouvons alors « *fractionner ce mouvement en petites portions « élémentaires »* » auxquels nous allons affecter deux nombres :

- Un nombre « *cardinal* » permettant la mesure d'une « *portion d'espace* », soit la longueur.
- Un nombre « *ordinal* » permettant la mesure d'une « *portion de temps* » et la description du parcours.

⁷éduscol | Ministère de l'Education Nationale et de la Jeunesse | Direction générale de l'enseignement scolaire [Internet]. [cité 9 mai 2024]. J'enseigne au cycle 3. Disponible sur: <https://eduscol.education.fr/87/j-enseigne-au-cycle-3>

⁸éduscol | Ministère de l'Education Nationale et de la Jeunesse | Direction générale de l'enseignement scolaire [Internet]. [cité 9 mai 2024]. J'enseigne au cycle 4. Disponible sur: <https://eduscol.education.fr/90/j-enseigne-au-cycle-4>

Cette approche propose d'utiliser la vitesse comme définition du mouvement et fusion de l'espace et du temps. Elle pourrait être utilisée pour introduire et définir les notions d'espace et de temps en connaissant ses limites, notamment lorsqu'elle refond la notion de trajectoire comme intrinsèque à la vitesse, ce qui, nous le verrons plus loin, pourrait constituer un biais cognitif, obstacle au traitement d'un phénomène de mouvement.

1.3. Définition par la dimension.

Nous pouvons considérer une autre manière d'aborder les concepts d'espace et de temps : une étude mathématique permettant de les définir par leurs dimensions. En effet, si nous nous intéressons à l'espace, depuis Pythagore⁹, il semble que notre perception sensorielle nous apporte une preuve de la tridimensionnalité de l'espace. Cette idée semble faire l'unanimité dans la communauté scientifique et s'impose comme résultat de l'expérience universelle. Aristote considère l'espace de la même manière et applique cela au mouvement. En effet, le mouvement du « corps », dont nous parlions plus haut, est lui aussi en trois dimensions et se décompose en deux catégories de mouvement : « *le mouvement rectiligne (dirigé soit vers le haut, c'est-à-dire s'éloignant du centre, soit vers le bas, allant vers le centre) et le mouvement circulaire (qui tourne autour du centre).* ». C'est donc ici la « direction » qui permet de catégoriser les différents mouvements.

Le temps quant à lui, n'a qu'une direction (écoulement dans un sens unique). L'unidimensionnalité du temps est déjà établie pour Aristote qui, comme nous l'avons vu, définit le temps comme le « nombre du mouvement ». Avant Galilée, le temps n'est que l'écoulement de la vie, une durée. C'est à lui qu'il revient d'introduire le temps comme variable utilisée dans l'étude de la dynamique.⁹ A partir de cet instant, le temps fait partie intégrante du mouvement comme sa quatrième dimension. (C'est le début du rapprochement des concepts.) En effet, nous retrouvons toujours l'unidimensionnalité du temps. Isaac Barrow⁹, dans ses *Lectiones geometricæ* décrit le temps comme une ligne droite (1 dimension), composée d'une infinité de points : les « *instants* ».

Enfin, Paty en vient à la fusion quadridimensionnelle de l'espace-temps : « On ne rencontre, à ma connaissance, chez aucun auteur jusqu'à la théorie de la relativité, l'idée aussi fortement exprimée d'une symétrie et d'une interpénétration réciproque entre l'espace et le temps : par le mouvement, l'espace est temporalisé et le temps est spatialisé. (Les transformations galiléennes indiquaient seulement la pénétration de l'espace par le temps, celle du temps par

⁹ Paty M. Les trois dimensions de l'espace et les quatre dimensions de l'espace-temps. Flament, HAL CCSD, p. 87-112, 1998.

l'espace n'interviendrait qu'avec les transformations de Lorentz de la Relativité restreinte). ». Nous avons déjà parcouru ce concept dans la partie 1.1.

Cependant, même si aujourd'hui certaines théories évoquent la possibilité d'un nombre de dimension supérieur pour l'espace-temps, l'utilisation d'un modèle d'espace-temps quadridimensionnel semble le plus adapté à l'enseignement de la physique puisqu'il est le plus proche de nos sens. De plus, par la manipulation de la géométrie acquise en cours de mathématiques, les élèves ont l'habitude de manipuler les dimensions : la ligne (1 dimension), la surface (2 dimensions) et enfin le volume (3 dimensions). Malheureusement, le cerveau humain éprouve de grandes difficultés à penser en plus de trois dimensions. C'est en tout cas ce que nous explique Poincaré dans son article intitulé "Pourquoi l'espace a trois dimensions". Le continu à trois dimensions est le seul qui nous apparaisse naturel. L'espace-temps à quatre dimensions demande de faire preuve d'intuition. Cette intuition n'est pas innée mais acquise et se construit à force de réflexion et de travail.

Ainsi, aborder les concepts d'espace et de temps par les dimensions semble être une approche cohérente en dynamique tant que nous nous limitons à une ou trois dimensions (dans un cas nous fixons la position, dans l'autre, le temps). Le fait de faire travailler nos élèves sur les quatre dimensions de l'espace-temps simultanément est un exercice nécessaire pour comprendre la théorie de la relativité mais il demande de bonnes capacités d'abstraction. C'est pourquoi, l'enseignant doit être indulgent envers les élèves qui considèrent plus facilement les concepts d'espace et de temps par la perception et la mesure que par l'intuition.

2. Les conceptions initiales : enjeu et analyse.

Maintenant que nous avons parcouru les éléments essentiels à aborder pour présenter les concepts d'espace et de temps, il semble nécessaire de réfléchir aux conceptions initiales et représentations (nous reviendrons sur la différence) des élèves afin d'adopter des techniques d'enseignement adaptées.

2.1. Les conceptions initiales.

2.1.1. Définition.

Pour l'enseignant, il faut considérer qu'un élève ne découvre jamais l'entièreté d'un concept en classe. L'élève, depuis sa naissance, se construit une idée du monde qui l'entoure afin de répondre à ses questionnements. Ce système de pensée lui est propre et lui permet de répondre de manière satisfaisante aux phénomènes de son quotidien. Ainsi, lorsqu'il est en classe, il a déjà une préconception du phénomène abordé : une conception initiale. La notion de conception initiale vient à l'origine de celle de « représentation » inventée par Emile Durkheim, sociologue français. Les représentations ont été ensuite étudiées dans le cadre de la didactique des sciences et notamment par Jean Migne qui nous en donne une définition :

« Une représentation peut être considérée comme un modèle personnel d'organisation des connaissances par rapport à un problème particulier. [...] La différence entre représentation et concept scientifique n'est pas une différence de degré mais elle constitut deux modes de connaissances distincts. »¹⁰

Ainsi, ce que Jean Migne appelle « représentation » est un mode de réflexion fonctionnel face à une situation problème définie, dans un contexte donné. Cependant, ce schéma de pensée ne correspond en aucune façon au savoir scientifique, bien que résultat de l'expérience, mais permet simplement d'aboutir à une conclusion satisfaisante au problème dans un contexte précis. C'est par ailleurs le paramètre « contexte » que l'enseignant peut utiliser afin de rendre la conception initiale inopérante, nous y reviendrons.

La question de la différence entre la représentation et la conception initiale se pose alors puisque ces termes sont utilisés de façon indifférente dans de nombreux articles. Pour Mélanie Correia, elle réside dans le fait que « les représentations sont un moyen d'exprimer des

¹⁰ Astolfi JP, Darot É, Ginsburger-Vogel Y, Toussaint J. Chapitre 15. Représentation (ou conception). In: Mots-clés de la didactique des sciences [Internet]. Louvain-la-Neuve: De Boeck Supérieur; 2008 [cité 1 mai 2024]. p. 147-57. (Pratiques pédagogiques; vol. 2e éd.). Disponible sur: <https://www.cairn.info/mots-cles-de-la-didactique-des-sciences--9782804157166-p-147.htm>

conceptions, à travers la traduction matérielle, par le langage ou un code, d'une idée ou d'un concept »¹¹. La différence repose alors sur le fait que la conception est une idéologie tandis que la représentation est la manière dont la conception se manifeste au sujet. Cette nuance peut aussi être considérée comme une différence d'attribution. La conception initiale est propre à l'individu tandis que la représentation, elle, peut être partagée.

Tout comme nous avons vu précédemment que les œuvres d'Aristote et Galilée s'opposent de bien des manières et que les travaux de Galilée se sont présentés comme la connaissance nouvelle infirmant les travaux d'Aristote, les conceptions initiales sont dites « aristotéliennes » contrairement aux savoirs appris que l'on nomme « conceptions galiléennes ». Nous voyons ici que les conceptions aristotéliennes sont la source de biais et obstacles à l'apprentissage, d'où la nécessité de les déconstruire. Nous reviendrons sur la présentation des travaux de Galilée en opposition à ceux d'Aristote lors de la conception de la séquence pédagogique.

2.1.2. L'enjeu de la déconstruction.

Le rôle de la physique est d'expliquer et de prédire les phénomènes naturels. Ainsi, il est essentiel pour l'élève que les savoirs qu'il apprend dans cette discipline soient observables dans le réel et vérifiables par l'expérience. C'est ce qu'André Giordan, père fondateur de la didactique de la biologie, exprime en 1996 :

« La conception n'est pas le produit de la pensée, elle est le processus même de l'activité mentale. Elle devient une stratégie, à la fois comportementale et mentale, que gère l'apprenant pour réguler son environnement ».

En conséquence, lorsqu'un élève élabore lui-même une solution à un problème, tant que l'explication est fonctionnelle et lui permet d'appréhender le monde concret, elle est valable et convaincante aux yeux de l'élève. Giordan propose alors de déconstruire les conceptions initiales pour favoriser la conception scientifique ; c'est le rôle de l'enseignant.

L'objectif est de faire prendre conscience aux élèves que leurs modes de pensée ne fonctionnent pas de façon absolue. Cela a pour effet de faire ressentir à l'élève le besoin d'acquiescer un nouveau mode de fonctionnement opérant. La mission de l'enseignant est donc de rendre le contenu du cours utile et efficace dans la vie quotidienne pour que l'élève puisse remplacer sa conception initiale par le savoir acquis. C'est l'idée que Giordan développe dans

¹¹ Mélanie Correia. Quels types de représentation peut-on observer chez les élèves de cycle 3 en ce qui concerne le volcanisme ? Quels moyens mettre en place pour les faire évoluer ? Education. 2012. ffdumas-00762082f

son modèle d'apprentissage allostérique¹². Il s'agit d'une image inspirée de la chimie stérique. Pour résumer simplement, les conceptions initiales sont liées entre elles. Elles sont interdépendantes et interagissent entre elles. Un sujet se construit une conception initiale à partir de ce qu'il connaît déjà, en l'occurrence, ses conceptions initiales antérieures. Ce réseau de conceptions initiales est comparé aux réseaux d'acides aminés formant les protéines. A la manière d'un réactif introduit dans le système « protéine », la connaissance nouvelle doit être introduite sur le site réactionnel le plus favorable à la réorganisation des connaissances. C'est alors à l'enseignant de déterminer le site, en d'autres termes, la conception initiale à déconstruire pour rendre le système des conceptions initiales inopérant et « fixer » le savoir scientifique.

Néanmoins, les conceptions initiales peuvent persister après avoir acquis le savoir savant. Piaget¹³ développe sa théorie des six stades du développement de l'enfant, chacun faisant appel à des stratégies de pensée différentes. Lorsque l'enfant passe au stade de développement suivant, son mode de raisonnement n'est plus le même, il mobilise différents aspects cognitifs (des réflexes instinctifs aux opérations intellectuelles abstraites). Or, Piaget identifie la persistance de modes de raisonnement appartenant aux stades de développement précédents, notamment la prédominance des fonctions figuratives sur les fonctions opératives. Les fonctions figuratives sont utilisées dans le stade des opérations concrètes. Elles permettent de se représenter les choses. Lorsque l'enfant passe au stade des opérations formelles, il ne devrait plus avoir besoin des fonctions figuratives, seulement des fonctions opératives.

Une explication plausible à la persistance des conceptions initiales est que le contexte dans lequel nous réfléchissons influence les réponses apportées par la réflexion. En dehors du contexte scolaire et professionnel, les conceptions initiales prennent le dessus sur le savoir acquis. L'apprentissage est contextualisé, d'où l'importance de décontextualiser le savoir en liant les phénomènes étudiés au monde réel. C'est une des stratégies de transposition didactique à explorer.

2.2. Analyse de quelques conceptions initiales.

Dans cette partie nous allons relever quelques conceptions initiales courantes des élèves qui perturbent l'apprentissage de la mécanique classique. Certaines de ces conceptions ont été

¹² Laboratoire de Didactique et d'Epistémologie des Sciences [Internet]. [cité 8 mai 2024]. Disponible sur: https://www.unige.ch/fapse/SSE/teachers/giordan/LDES/publi/rech/th_app.htm

¹³ Niklas-Salminen A. Chapitre 1 : Le développement mental de l'enfant selon Jean Piaget. In: Création poétique chez l'enfant [Internet]. Aix-en-Provence: Presses universitaires de Provence; 1997 [cité 1 mai 2024]. p. 131-44. (Hors collection). Disponible sur: <https://books.openedition.org/pup/754>

relevées par des didacticiens des sciences, d'autres ont pu être observées et décelées au cours de mes différents stages.

En effet, au cours de ma première année de master, j'ai eu l'occasion de mettre en place des questionnaires destinés aux élèves et les interrogeant sur les concepts d'espace et de temps. Dans un premier temps, j'ai réalisé un questionnaire (Annexe 2.1.) que j'ai pu proposer à 134 élèves du collège Albert Calmette à Limoges (établissement R.E.P.) : 82 élèves de 3^{ème}, 21 élèves de 5^{ème} et 31 élèves de 6^{ème}. J'ai souhaité construire ce questionnaire avec des questions très ouvertes : « Pour moi l'espace / le temps c'est : ... ». Cependant, une erreur que j'ai commise a été d'ajouter au support du questionnaire des icônes orientant la réflexion des élèves. Notamment, afin d'éviter des réponses relevant du champ de la météorologie comme définition du temps, j'ai ajouté l'image d'une horloge. L'ajout de ces icônes peut être considéré comme un biais cognitif imposé aux élèves et rendre l'étude inexploitable puisque nous éliminons à l'origine certaines réponses qui pourraient mettre en exergue une conception initiale. D'autant plus que cela n'a pas empêché les réponses en rapport avec la météo. Ainsi, j'ai remanié ce questionnaire (Annexe 2.2.) en retirant les icônes et en changeant la question par « Proposez une définition de l'espace / du temps : ». Il a été proposé à tous les niveaux du secondaire, de la 6^{ème} à la terminale afin de déceler plus de conceptions initiales et d'envisager des stratégies adaptées.

Même si ce questionnaire n'apporte pas une liste exhaustive des conceptions initiales des élèves, il m'a permis de faire ressortir celle qui est au cœur de ce travail de recherche et ainsi de faire apparaître la problématique. J'utiliserai tout de même certaines réponses qui me semblent intéressantes pour construire la séquence pédagogique proposée.

2.2.1. La séparation entre l'infiniment grand et l'infiniment petit.

Un constat remarquable au sein des classes, et qui m'a conduit à construire la problématique de ce mémoire, concerne une conception initiale très commune chez les élèves : la Terre et l'espace constituent deux entités bien distinctes, pour lesquelles les lois de la Physique ne s'appliquent pas de la même manière.

Revenons sur l'exemple donné en introduction, observé au cours du chapitre « Mouvement dans un champ » en classe de Terminale spécialité (Annexe 3). A l'occasion d'un premier exercice, nous étudions le mouvement d'un satellite en orbite d'une planète selon la méthode classique :

- Définir le référentiel et le système
- Etablir le bilan des forces
- Appliquer la deuxième loi de Newton

- Trouver les équations horaires par intégrations successives
- Définir l'équation de la trajectoire en remplaçant la variable de temps

Par habitude, les élèves appliquent la méthodologie sans difficulté apparente. Nous passons désormais à un second exercice sur le mouvement d'un électron autour du noyau de l'atome. Les élèves déterminent le référentiel, établissent le bilan des forces puis interrompent leur raisonnement. En leur expliquant que nous utilisons la même méthode que précédemment, je m'aperçois que les élèves sont très surpris que nous utilisions le principe fondamental de la dynamique. Ici, nous avons fait une transition entre un exercice sur l'infiniment grand et un autre sur l'infiniment petit, alors, pour l'élève, il n'y a aucune raison que les principes physiques soient les mêmes. Il est important de rappeler que cette étude s'inscrit dans le cadre de la mécanique classique newtonienne, où les lois physiques sont considérées comme universelles. Il est toutefois intéressant de constater que les élèves commencent déjà à s'interroger sur les limites d'application de certaines lois et tentent d'en définir les domaines de validité.

D'une façon plus générale, les élèves dissocient la Terre de l'espace et il en va de même pour les événements se produisant sur Terre ou dans l'espace. Par exemple, voici quelques réponses au questionnaire illustrant ce principe : « L'espace c'est ce qu'il y a au-dessus de nous » ; « L'espace c'est le monde autour de la Terre ». L'espace est alors considéré comme une étendue « vide » séparant tous les corps, eux-mêmes n'appartenant pas à l'espace.

2.2.2. L'analogie force-vitesse.

2.2.2.1. Sans force, il ne peut y avoir de mouvement.

La première loi de Newton, le principe d'inertie, est étudié en classe de seconde (Annexe 4) mais c'est un principe qui régit la notion même de mouvement, d'où l'importance de l'étudier le plus tôt possible.

Or, dans la croyance primaire de l'élève, un objet est immobile lorsqu'aucune force ne s'exerce sur lui et non lorsque toutes les forces se compensent. De même, un objet ne se déplace que si « *il y a une force qui le « pousse » et que cette force est alors nécessairement dans le sens du mouvement.* »¹⁴. Nous retrouvons ici la même conception que celle d'Aristote qui résiste à

¹⁴ Réussir en mécanique du cycle 3 au cycle terminal du lycée : eduscol | Ministère de l'Education Nationale et de la Jeunesse | Direction générale de l'enseignement scolaire [Internet]. [cité 1 mai 2024]. Recherche et innovation pour l'enseignement des sciences physiques. Disponible sur: <https://eduscol.education.fr/225/recherche-et-innovation-en-physique-chimie>

l'enseignement du principe d'inertie et du principe fondamental de la dynamique. La force est ici l'origine du mouvement de l'objet et non celle de la modification de sa vitesse.

Cela signifie également que le repos est considéré comme un concept distinct du mouvement et même le non-mouvement. Or, le repos correspond simplement à un cas particulier de mouvement.

Dans le cadre de l'élaboration de la séquence pédagogique, il semble donc nécessaire de s'attarder sur le principe d'inertie en amont de la force d'interaction gravitationnelle.

2.2.2.2. L'adhérence force-vitesse.

Laurence Viennot¹⁵ étudie ce concept d'adhérence force-vitesse en proposant plusieurs exercices à des étudiants. Un en particulier proposait, à partir du schéma des trajectoires de différentes balles en chute libre de déterminer si les forces qui agissaient sur les balles étaient identiques ou non. Une des réponses les plus fréquentes était : « *les forces agissant sur les balles sont différentes puisque les mouvements le sont.* ». La force est donc bien responsable de la trajectoire du mouvement ici. On retrouve aussi dans d'autres études de Laurence Viennot¹⁶, pour le même type d'exercice, des justifications du type : les forces sont différentes car les vitesses sont différentes et « *les vitesses jouent un rôle dans les forces* ». Ici nous avons une inversion du second principe de la dynamique, ce ne sont pas les forces qui ont pour effet de modifier l'accélération de l'objet mais la vitesse qui a un effet sur la force. Cette conception est liée au fait que la force émanerait de l'objet lui-même, nous verrons cela dans la partie suivante.

Nous avons vu, dans la première partie de ce dossier, qu'il était usuel de définir le mouvement par sa trajectoire et l'évolution de sa vitesse. En effet, il est nécessaire que l'apprenant comprenne que ces deux éléments sont indispensables à la définition du mouvement. Si nous décrivons le mouvement uniquement par la vitesse, l'élève pourrait en venir à la conception suivante : tous les mouvements uniformes sont par essence le même mouvement. Ou bien parallèlement avec la trajectoire : si nous ne décrivons le mouvement uniquement par la trajectoire, deux mouvements de même trajectoire correspondraient au même mouvement.

En somme, la conception selon laquelle un objet est maintenu en mouvement par l'application permanente d'une force sur l'objet constitue un obstacle à l'assimilation du principe d'inertie

¹⁵ VIENNOT, L. (1989). Bilans des forces et loi des actions réciproques : analyse des difficultés des élèves et enjeux didactiques. Bulletin de l'Union des Physiciens, n° 716, pp. 951-971.

¹⁶ Laurence Viennot. Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire. Enseignement de la physique [physics.ed-ph]. Université Paris VII, 1977. Français. ffNNT : ff. fftel-01275119

de Newton¹⁷ « *qui exige de la part des élèves un certain niveau de conceptualisation et d'abstraction.* ». Cette idée est très présente chez les élèves et il est nécessaire de s'en affranchir afin d'aborder la mécanique.

Nous pouvons également insister sur le fait que l'appréhension du mouvement nécessite l'étude de l'évolution de la vitesse et non de la vitesse instantanée. Si les élèves parviennent à assimiler cette subtilité, il leur sera d'autant plus facile de comprendre le principe fondamental de la dynamique.

¹⁷ Réussir en mécanique du cycle 3 au cycle terminal du lycée : éducol | Ministère de l'Education Nationale et de la Jeunesse | Direction générale de l'enseignement scolaire [Internet]. [cité 1 mai 2024]. Recherche et innovation pour l'enseignement des sciences physiques. Disponible sur: <https://eduscol.education.fr/225/recherche-et-innovation-en-physique-chimie>

2.2.3. L'origine d'une force.

Comme nous l'avons vu dans la partie précédente, une conception particulièrement ancrée chez l'apprenant consiste à imaginer qu'une force appliquée à un objet prend son origine dans l'objet même. Prenons l'attraction terrestre. Un des modes de fonctionnement de l'enfance est l'anthropomorphisme, soit la tendance à attribuer à des objets ou phénomènes des caractéristiques ou réactions humaines. Ainsi, un objet tombe sur le sol parce qu'il « veut rejoindre le sol ». La chute du corps relève de la « volonté » de l'objet de rejoindre le sol. Ainsi, lorsque le sujet grandit, même s'il abandonne l'anthropomorphisme, une conception selon laquelle la force viendrait de l'objet sur lequel elle s'applique peut persister.

Une variante de cette conception initiale est qu'une force ne pourrait être originaire que d'un corps « vivant »¹⁸. Par exemple, pour déplacer un meuble, je suis obligée d'appliquer une force de poussée et cette force ne vient pas du meuble mais de moi. Ainsi, par analogie avec l'expérience quotidienne, l'apprenant a tendance à imaginer que « *l'action exercée sur un objet [...] nécessiterait toujours selon ces conceptions erronées, un corps vivant pour être exercée* ».

En conséquence, lorsque nous en venons à l'étude du pendule ou bien du ressort, la force de tension du fil (ou de la tige) devient un concept inaccessible puisqu'elle est exercée par un objet. Ici, cette conception s'oppose à l'apprentissage de la troisième loi de Newton : le principe des actions réciproques.

Au regard des sections précédentes, nous pouvons conclure qu'il est essentiel de revenir sur les trois lois de Newton, bases de la mécanique classique, avant d'aborder la loi de gravitation universelle. Cela fera l'objet d'une partie de la séquence pédagogique proposée.

¹⁸ Réussir en mécanique du cycle 3 au cycle terminal du lycée : eduscol | Ministère de l'Education Nationale et de la Jeunesse | Direction générale de l'enseignement scolaire [Internet]. [cité 1 mai 2024]. Recherche et innovation pour l'enseignement des sciences physiques. Disponible sur: <https://eduscol.education.fr/225/recherche-et-innovation-en-physique-chimie>

3. Stratégies d'enseignement.

Au cours de cette partie, nous allons parcourir différentes méthodes d'enseignement à mettre en place au sein de la séquence pédagogique qui sera testée afin de pouvoir apporter des réponses à la problématique de ce mémoire.

3.1. L'histoire des sciences.

Dans les préambules des bulletins officiels de l'éducation nationale, dans la partie « repères pour l'enseignement », il est bien souvent recommandé d'utiliser l'histoire des sciences dans l'introduction des concepts (Annexe 5). L'objectif derrière l'approche par l'histoire des sciences est de retracer le cheminement de la construction de la connaissance scientifique afin d'en déterminer les enjeux et les limites. Cette méthode permet de placer les élèves dans une situation où ils jugent eux-mêmes nécessaire le fait de développer leurs connaissances, ce qui justifie l'étude des principes. De plus, l'élève, comprenant le processus de réflexion qui mène à la théorie, abandonne la notion du « coup de génie scientifique » qui a tendance à être décourageante.

L'objectif est alors d'intégrer l'histoire des sciences dans la séquence pédagogique à construire. Dans le cadre de cette recherche, la séquence pédagogique sera élaborée pour une classe de 3^e. Il semble donc intéressant d'adapter l'approche de Philippe Colin et Valentin Maron sur l'enseignement de la gravitation newtonienne au travers de l'histoire des sciences et de la construction de la connaissance¹⁹. Cette démarche permettrait d'introduire progressivement, avec des argumentants étayés, les trois lois de Newton, posant ainsi les bases fondamentales de la mécanique.

3.2. Les évaluations diagnostique et formative.

Une autre méthode permettant de favoriser l'apprentissage est de déceler les conceptions initiales en amont du cours et tout au long de l'apprentissage. L'évaluation n'a pas toujours pour objectif d'attribuer une note à l'élève (évaluation sommative), elle est aussi un bon moyen d'estimer l'avancée de l'élève. C'est dans ce cadre qu'interviennent les évaluations diagnostiques et formatives.

- L'évaluation diagnostique intervient au commencement de l'apprentissage. Elle permet de faire le point sur les prérequis des élèves et d'identifier d'éventuelles lacunes, difficultés et même conceptions initiales afin que l'enseignant puisse adapter son cours aux besoins des élèves.

¹⁹ Maron V, Colin P. Une reconstruction de la théorie de la gravitation newtonienne : proposition d'une approche d'enseignement inspirée de l'histoire des idées. RDST, ENS Edition, 2017, n°16, p. 93-128.

- L'évaluation formative a pour objectif de contrôler régulièrement, au cours du processus d'apprentissage, les acquis des élèves. En conséquence, l'enseignant peut revenir sur certains points si nécessaires. Cela permet de récupérer un élève en difficulté plutôt que d'aborder les principes suivants sans avoir annihilé la difficulté. La physique-chimie étant une discipline cumulative, cette étape est indispensable.

Ainsi, il semble intéressant d'intégrer à la séquence des évaluations de ce type, à la manière de Laurence Viennot, afin d'essayer d'observer la progression de l'élève en amenant une difficulté supplémentaire à chaque évaluation formative.

3.3. La tâche complexe.

D'après Gaston Bachelard, « *c'est en termes d'obstacles qu'il faut poser le problème de la connaissance scientifique* »²⁰. L'élève apprend contre une connaissance antérieure. Une méthode d'enseignement recommandée par Bachelard est alors la tâche complexe. Elle constitue un ensemble d'exercices nécessitant la mobilisation de multiples compétences pour être résolus. Ces exercices ont pour objectif d'amener l'élève à progressivement sortir de sa zone de confort. Par exemple, si une tâche complexe nécessite de maîtriser quatre compétences, l'élève ne sera ni parfaitement à l'aise, ni complètement perdu puisqu'il maîtrisera ces quatre compétences à des degrés différents.

Il est essentiel de permettre aux élèves d'évaluer leur niveau de maîtrise des compétences lors d'une évaluation ou d'une tâche complexe. Cette prise de conscience leur offre la possibilité de suivre leur progression tout au long de l'année, en particulier lorsque la même compétence est évaluée à plusieurs reprises.

Étant donné qu'une tâche complexe mobilise plusieurs compétences, un élève ayant atteint un niveau de maîtrise "très satisfaisant" dans l'une d'elles peut alors concentrer ses efforts sur l'amélioration d'une autre compétence moins aboutie. Cela lui permet d'optimiser son apprentissage, en évitant que la première compétence ne constitue un frein à la réalisation de la tâche mais plutôt un pilier pour s'améliorer dans d'autres domaines.

Ainsi, l'intérêt de faire travailler les élèves en groupe apparaît. Le modèle d'organisation des apprentissages appliqué dans notre société est le socio-constructivisme. Ce modèle est basé sur la collaboration des élèves leur permettant de construire leurs connaissances par eux-mêmes pour qu'elles s'ancrent plus facilement dans l'esprit. L'élève, en tant que membre d'un collectif, apprend à structurer ses connaissances pour partager son point de vue. De cette

²⁰ Bachelard G. La formation de l'esprit scientifique : contribution à une psychanalyse de la connaissance objective. 11ème édition. Librairie philosophique J. Vrin; 1980. (Bibliothèque des textes philosophiques).

manière, les connaissances sont acquises efficacement en classe, avec un enseignant expert présent pour cadrer le travail, trier et réorganiser l'information.

Nous pouvons rejoindre cette méthode à la vision de Lev Vygotsky. Ce dernier travaille sur l'accompagnement de l'apprenant par le professeur. Selon lui, l'élève n'apprend pas en autonomie mais en collaboration avec son enseignant lorsque la tâche assignée à l'élève se situe dans la « zone proximale de développement »²¹. Cette « zone » correspond à la marge de progression de l'élève en considérant son développement cognitif. D'un point de vue pratique : l'élève ne doit pas se situer dans une zone de confort intellectuel mais l'objectif n'est certainement pas de le placer face à un problème insoluble pour l'apprenant qui ne possède pas les outils nécessaires à la résolution du problème à ce stade de son développement. Cela n'entraînerait que de la frustration chez l'élève, allant ainsi contre le plaisir de l'apprentissage. Ainsi, la tâche qui est confiée à l'élève doit faire appel à des concepts qu'il maîtrise, des connaissances antérieures tandis que le professeur apporte une « aide appropriée » pour permettre à l'élève de résoudre son problème. Cela représente parfaitement la nécessité de mettre en œuvre de la différenciation, voire de l'individualisation parfois, au cours de l'enseignement. Les programmes scolaires sont aujourd'hui construits autour de la zone proximale de développement afin que l'enseignant soit présent pour apporter les éléments nécessaires à la progression de l'élève.

En regroupant ces idées, nous pourrions intégrer des tâches complexes afin de faciliter la déconstruction des conceptions initiales. Ces activités permettraient de varier les différents types d'approches pour les élèves, par exemple :

- Le problème ouvert : composé d'une unique et brève question, le problème ouvert doit être construit de manière à rendre les conceptions initiales inopérantes et à décontextualiser les connaissances.
- La démarche d'investigation expérimentale : démarche d'enquête par une approche essai-erreur. Les élèves doivent respecter le cheminement de plusieurs étapes : Observation d'un phénomène, Problématisation, Formulation d'hypothèses par les élèves, Elaboration d'un protocole expérimental, Expérimentation, Recueil des résultats, Analyse des résultats, Conclusion.

²¹ Zone proximale de développement. In: Wikipédia [Internet]. 2024 [cité 1 mai 2024]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Zone_proximale_de_d%C3%A9veloppement&oldid=212510992

4. Elaboration de la séquence pédagogique proposée.

Cette partie a pour objectif de proposer une séquence pédagogique sur la loi de la gravitation universelle, en s'appuyant sur les différentes stratégies d'enseignement présentées précédemment. Au cours de cette séquence, nous aborderons d'autres notions clés de la mécanique, notamment les trois lois de Newton, afin de déconstruire efficacement les conceptions initiales qui entravent l'apprentissage des concepts.

4.1. Contexte de l'expérience.

La séquence pédagogique proposée est mise en œuvre auprès d'une classe de 3^e dans le cadre de mon contrat d'alternance. L'établissement dans lequel nous nous plaçons est un collège urbain situé au centre de Limoges, ville de taille moyenne dans le département de la Haute-Vienne (87). En terme socio-éducatif, le collège est un établissement public accueillant une population scolaire variée : environ 750 élèves, principalement issus d'un quartier populaire situé à proximité de l'établissement ainsi que d'une petite commune voisine de Limoges. Les parents de ces élèves proviennent de catégories socio-professionnelles diversifiées.

La séquence est destinée à une classe de 3^e composée de 30 élèves, dont 16 garçons et 14 filles. Tous les élèves suivent les deux options obligatoires : LV1 anglais et LV2 espagnol. Parmi eux, 10 élèves ont également choisi l'option grec, tandis que 2 autres participent à la chorale de l'établissement.

4.2. Contexte de la séquence.

Dans la programmation, la séquence est mise en place à partir du mois de novembre. Elle s'inscrit dans le thème « mouvement et interactions » du programme officiel de cycle 4. Un premier chapitre consacré à la caractérisation du mouvement précède cette séquence. Au cours de ce premier chapitre, les élèves ont abordé ou révisé les notions de référentiel, de trajectoire et de vitesse. La notion de relativité du mouvement a été introduite au travers d'exemples simples et accessibles par les élèves. La notion de vitesse a été abordée par la formule liant vitesse, distance et durée, ainsi que par ses caractéristiques : la direction et le sens. Enfin, une attention particulière a été portée sur le fait que la caractérisation du mouvement n'implique pas de connaître la vitesse instantanée du système, mais bien son évolution au cours du temps. Ce point permettant d'aborder plus sereinement le principe fondamental de la dynamique par la suite.

La séquence s'intègre maintenant dans un second chapitre appartenant au même thème du programme. Ce chapitre, intitulé « Les forces » correspond à l'extrait suivant du programme de cycle 4 :

Modéliser une action exercée sur un objet par une force caractérisée par une direction, un sens et une valeur	
<p>Identifier les actions mises en jeu (de contact ou à distance) et les modéliser par des forces. Exploiter l'expression littérale scalaire de la loi de gravitation universelle, la loi étant fournie.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Action de contact et action à distance. - Force : direction, sens et valeur. - Force de pesanteur et son expression $P=mg$. 	<p>L'étude mécanique d'un système peut être l'occasion d'utiliser les diagrammes « objet-interaction ».</p> <p>Expérimenter des situations d'équilibre statique (balance, ressort, muscles).</p> <p>L'étude de la loi de gravitation est l'occasion d'aborder qualitativement la notion d'interaction.</p> <p>Pesanteur sur Terre et sur la Lune, différence entre poids et masse (unités). L'impesanteur n'est abordée que qualitativement.</p>

Figure 1 : Extrait du bulletin officiel de l'éducation nationale, cycle 4, 2020²²

Les notions d'action de contact ou à distance, de modélisation par la force et ses différentes caractéristiques ainsi que les diagrammes objet-interaction sont abordées dans une première partie du chapitre nommée « I. Modéliser une action mécanique ». Cette partie de cours s'appuie sur une première activité : « Activité 1 : De l'action à la force » reprenant les notions évoquées ci-dessus.

C'est au sein de la deuxième partie du chapitre, intitulée « II. L'interaction gravitationnelle et la force de pesanteur », que s'intègre cette séquence. Elle-même est divisée en deux sous-parties : « II. 1) L'interaction gravitationnelle » et « II. 2) La force de pesanteur ».

Ainsi, les objectifs visés par cette séquence sont les suivants :

- Établir, comprendre et appliquer l'expression littérale scalaire de la loi de gravitation universelle dans différentes situations,
- Comprendre les trois lois du mouvement de Newton,
- Relier la loi de gravitation à la notion d'interaction et modéliser cette interaction par un schéma.

²² éducol | Ministère de l'Éducation Nationale | Direction générale de l'enseignement scolaire [Internet]. [cité 19 déc 2024]. J'enseigne au cycle 4. Disponible sur: <https://eduscol.education.fr/90/j-enseigne-au-cycle-4>

4.3. Séquence pédagogique.

4.3.1. Plan de la séquence.

La séquence pédagogique proposée s'articule ainsi :

- Une première évaluation diagnostique sous forme de questionnaire préliminaire, comportant huit questions portant sur les notions abordées dans la séquence, présentées dans l'ordre chronologique.
- Une première activité centrée sur l'histoire des sciences, explorant les travaux de Galilée sur la chute des corps et ceux de Kepler sur le mouvement des planètes, afin d'étudier le mouvement des objets dans deux cadres distincts pour le moment.
- Une seconde activité d'histoire des sciences, consacrée aux lois du mouvement et à l'interaction gravitationnelle, mettant en lumière la théorie de Newton comme une unification des lois du mouvement.
- Une activité expérimentale suivant une démarche d'investigation scientifique (tâche complexe), axée sur la relation entre le poids et la masse.
- La seconde partie de cours du chapitre, démontrant la relation $P=mg$ à partir de la force d'interaction gravitationnelle de Newton et présentant un exemple supplémentaire d'application sur la planète Saturne.
- Un problème ouvert (tâche complexe), servant également d'évaluation formative pour l'élève.
- Enfin, une évaluation sommative permettant de rendre compte de l'apprentissage des élèves au cours de cette séquence.

4.3.2. Evaluation diagnostique.

Dans un premier temps, un questionnaire préliminaire est proposé aux élèves. L'objectif de ce questionnaire est de stimuler leur intérêt en confrontant leurs conceptions initiales et de les encourager à réfléchir sur le thème de la séquence. Les réponses fournies par les élèves constituent une précieuse source d'information pour l'enseignant, qui peut adapter ses séances en fonction des résultats, en insistant sur certains points nécessitant un approfondissement ou, au contraire, en s'appuyant sur des notions déjà maîtrisées par les élèves. Le questionnaire (Annexe 6) reprend la chronologie prévue de la séquence au travers de huit questions.

La question 1 permet d'identifier les représentations des élèves concernant la gravité terrestre. Les questions 2 et 3 viennent compléter la première en faisant réfléchir les élèves sur le lien

entre le poids et la masse. Ces questions permettent également de déceler une première conception fréquente chez l'élève et qui consiste à associer la masse du corps à sa vitesse de chute. La question 3 permet également de vérifier l'intuition des élèves quant à la résistance du milieu. Selon les réponses à ces questions, nous pourrions adapter l'activité sur les travaux de Galilée concernant la chute des corps en conséquence.

Les questions 4 et 5 explorent l'intuition des élèves sur la force gravitationnelle agissant à distance. Elles introduisent le cadre des systèmes extra-terrestres, qui sera étudié dans l'activité sur les travaux de Kepler concernant le mouvement des planètes.

Les questions 6 et 7 quant à elles permettent de vérifier si les élèves font bien la distinction entre le poids (une force) et la masse (liée à la quantité de matière). Plus précisément, la question 6 permet de dégager une autre représentation des élèves : l'idée que le poids serait une propriété intrinsèque des corps, de la même manière que la masse, sans nécessairement comprendre que le poids résulte d'une force d'attraction exercée par la Terre, et non par l'objet, dans le cadre d'une interaction gravitationnelle. Une réponse typiquement révélatrice serait : « Parce que je suis lourd(e) ». Aussi, il est possible que certains élèves évoquent que l'air ou l'atmosphère les pousse vers le sol (en comparaison au vide qui règne dans l'espace). Cela trahirait une confusion avec la pression atmosphérique ou d'autres forces extérieures.

Enfin, la question 8 permet d'évaluer les prérequis des élèves pour introduire l'idée d'unification des lois de la mécanique classique au travers des travaux de Newton.

En somme, au travers de ces questions, nous cherchons à déceler d'éventuelles conceptions initiales que nous n'aurions pas anticiper et à préparer les élèves à l'introduction des lois du mouvement, de la loi de la gravitation universelle et de la force de pesanteur. L'objectif est de clarifier que le poids est une force exercée par la Terre, représentant un cas particulier de la force d'interaction gravitationnelle.

4.3.3. Première activité d'histoire des sciences.

La première activité explore les travaux de Galilée sur la chute des corps et ceux de Kepler sur le mouvement des planètes, afin d'étudier le mouvement des objets dans deux cadres distincts dans un premier temps. La seconde activité est consacrée aux lois du mouvement et à l'interaction gravitationnelle, mettant en lumière la théorie de Newton comme une unification des lois du mouvement (dans le cadre de la mécanique classique). L'approche, dans un premier temps séparée, des lois du mouvement de chute sur Terre et des lois de Kepler en astronomie sert ici de tremplin pour aborder l'unification des lois de la mécanique classique par Newton.

Cette activité est la deuxième activité du chapitre, intitulée « De la chute des corps au mouvement des planètes » (Annexe 7). Cette activité se découpe en deux parties : observations des phénomènes terrestres puis célestes. La première partie repose sur les travaux de Galilée sur la chute des corps. Pour cela, j'ai choisi de faire étudier un extrait du Discours de Galilée²³ publié en 1638. Après une rapide présentation de Galilée et de l'œuvre étudiée, les élèves peuvent étudier un extrait de la première journée du discours.

En termes de mise en œuvre, trois élèves volontaires jouent les rôles de Salviati, Sagredo et Simplicio et lient le texte à la classe. Un intérêt de cette œuvre est que la façon dont elle est rédigée se prête particulièrement bien à une représentation théâtrale avec les élèves ce qui permet de raccrocher certains élèves par une approche « ludique ». Une difficulté que les élèves pourraient rencontrer pour l'analyse de ce texte et sa compréhension réside dans le vocabulaire utilisé. C'est pourquoi, nous pourrions proposer aux élèves un temps réservé à l'explication du vocabulaire où les élèves pourraient interroger le professeur sur tous les mots de vocabulaire bloquant la compréhension du texte.

Une fois le texte clarifié, les élèves peuvent répondre à un ensemble de questions selon le schéma suivant :

- Une lecture collective de l'énoncé de la question et, si cela s'avère nécessaire, une reformulation de la question par un autre élève ou par le professeur.
- Un temps de travail en autonomie pour les élèves. Durant cette phase, les élèves ont la possibilité de discuter entre eux afin d'échanger leurs idées et peuvent également réaliser toute expérience qu'ils jugeront nécessaires, en fonction du matériel disponible, et sous la surveillance de l'enseignant.
- Une mise en commun des propositions des élèves pendant laquelle le professeur relève les éléments de réponse intéressants afin de formuler une réponse correcte. Pour certaines questions, le professeur peut réaliser des démonstrations et expériences pour appuyer son propos.

Intéressons-nous plus précisément aux questions proposées. Les deux premières questions du questionnaire sont conçues pour mettre en lumière deux théories opposées : d'une part, la théorie d'Aristote selon laquelle la masse d'un objet influence sa vitesse de chute, et d'autre part, celle de Galilée qui démontre qu'en l'absence de frottements, deux objets de masses différentes lâchés simultanément d'une même hauteur atteignent le sol en même temps. Ces questions ont pour but de confronter les élèves à leurs propres conceptions initiales, souvent

²³ Galilée, G. (1638). Discours et démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles, Colin.

alignées avec l'idée intuitive d'Aristote, et de les amener à réfléchir sur la validité des idées de Galilée.

La question 3, quant à elle, introduit la notion de résistance du milieu. Elle invite les élèves à réfléchir à l'effet de la résistance de l'air sur la chute des corps, ouvrant ainsi la voie à l'étude des forces de frottement. Cette réflexion est essentielle pour comprendre les écarts entre les conditions idéales décrites par Galilée et les observations dans un environnement réel.

Les questions 4 et 5 servent à préparer deux expériences sur la chute des corps.

- Première expérience : Nous tentons de reproduire une chute sans frottements extérieurs significatifs. En choisissant deux objets de même taille et de même forme, les frottements de l'air s'appliquant à ces objets sont identiques. Ainsi, la seule variable dont nous étudions l'influence est la masse. Cette expérience vise à vérifier expérimentalement que la masse n'a pas d'impact sur la chute d'un corps dans un environnement donné. En fonction des conditions expérimentales les résultats peuvent s'écarter de la théorie. Ce sera ainsi l'occasion de faire réfléchir les élèves sur les différentes sources d'erreur.
- Deuxième expérience : Après avoir démontré que la chute des corps était indépendante de la masse, nous faisons varier un autre paramètre : la résistance de l'air. Pour cela, nous modifions la forme des objets afin d'illustrer l'effet des frottements. L'objectif est d'amener les élèves à comprendre que si la masse d'un objet n'influence pas sa chute, sa taille et sa forme jouent en revanche un rôle significatif. Un exemple concret comme celui des monoplaces de Formule 1, conçues pour minimiser la résistance de l'air grâce à une aérodynamique optimisée, peut aider les élèves à mieux assimiler ce concept.

L'objectif principal de ces expériences est de convaincre les élèves que la masse d'un objet n'influence pas sa vitesse moyenne de chute. Ce point est crucial pour dépasser les conceptions initiales erronées et adopter une vision scientifique du phénomène.

La question 6 constitue une transition vers l'introduction du principe d'inertie, qui lui-même permet d'aborder le principe fondamental de la dynamique plus sereinement. Elle met en évidence le lien entre les travaux de Galilée et les lois du mouvement formulées par Newton. Cette approche permet de souligner que la connaissance scientifique se construit progressivement au fil du temps, grâce à la collaboration et aux contributions successives des scientifiques. Elle démystifie l'idée selon laquelle les lois de la physique sont le fruit d'un «

coup de génie » isolé, et montre au contraire qu'elles s'appuient sur des bases historiques solides et des avancées collectives.

En résumé, ces questions et expériences visent à déconstruire les conceptions erronées, à renforcer la compréhension des phénomènes physiques, et à montrer comment la science évolue par étapes, dans une démarche collaborative et cumulative.

Nous proposons aux élèves une question introductive pour faire la transition entre les deux parties de l'activité : « Nous venons de voir que Galilée est l'un des premiers à avoir étudié la chute des corps sur Terre : Les lois qui régissent la chute des corps sur Terre sont-elles valables pour expliquer le mouvement des planètes ? ».

Cette question a pour objectif d'ouvrir la réflexion sur l'applicabilité des lois terrestres aux phénomènes observés dans l'Univers, élargissant le champ d'étude des lois physiques à des systèmes extraterrestres, ce qui nous amène à la seconde partie de l'activité.

La partie suivante de cette activité repose sur les travaux de Kepler sur le mouvement des planètes. Ainsi, nous proposons à un élève de lire l'introduction sur Johannes Kepler et quelques-unes de ses contributions scientifiques avant de projeter la vidéo choisie. La vidéo²⁴ dure 5 minutes et 11 secondes et explique les trois lois de Kepler et leur utilité. Ce support audiovisuel permet de diversifier les approches pédagogiques et capter l'attention du plus grand nombre d'élèves tout en offrant une perception dynamique du mouvement des planètes. Cela favorise l'engagement des élèves et permet de présenter des concepts complexes de manière accessible et visuelle. Notons que l'objectif n'est pas ici de faire apprendre par cœur les trois lois de Kepler mais simplement de susciter une réflexion sur leur importance dans la compréhension de l'Univers et leur lien avec la gravitation newtonienne, qui sera approfondi dans la suite de la séquence.

Seulement trois questions sont proposées aux élèves. Les questions 1 et 3 sont proposées sous la forme de QCM afin d'aider les élèves à trier les informations à collecter dans la vidéo, ce qui pourrait constituer une difficulté supplémentaire. La seconde question est une question ouverte pour une réflexion plus critique. La première question invite les élèves à comprendre que la gravité est le moteur principal régissant la structure et les mouvements des corps célestes dans l'Univers. La seconde question interroge les élèves sur l'intérêt d'établir des lois sur le mouvement. L'objectif est ici de montrer que la science s'est construite de manière

²⁴ Les lois de Kepler [Internet]. 2020 [cité 20 déc 2024]. Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=LjY7PiTFp0c>

progressive, en partant de contextes restreints jusqu'à l'unification opérée par Newton. Enfin, la dernière question permet de relier la seconde loi de Kepler (loi des aires) et le principe fondamental de la dynamique, que nous verrons dans l'activité suivante.

Un dernier paragraphe conclue cette activité, construite dans une démarche progressive, et fait le lien avec la suivante en présentant les travaux de Newton et leur intérêt vis-à-vis de l'étude du mouvement. Nous introduisons la légende de la pomme tombant de l'arbre en insistant sur le fait qu'il s'agit d'une légende, l'occasion de faire une digression sur la démarche de recherche de Newton.

En construisant cette activité, j'ai choisi d'en élaborer deux versions différenciées. La première est une version adaptée (Annexe 8) à la lecture par un élève dyslexique (cas de certains élèves de la classe). Pour cela, j'ai respecté les recommandations proposées telles que : l'utilisation d'une police droite et agrandie, la séparation nette des zones dédiées au texte et aux images, une interligne augmentée et un changement de police pour le texte extrait de l'œuvre de Galilée afin d'éviter toute confusion. Enfin, j'ai offert aux élèves la possibilité de choisir entre l'activité standard décrite précédemment et une version différenciée comportant des questions plus ouvertes (Annexe 9). Dans cette version, les deux premières questions de l'activité sont fusionnées en une question unique, sans indiquer explicitement la zone du texte où trouver la réponse. Les élèves doivent donc analyser le texte en autonomie. De plus, les expériences ne sont pas préétablies : les élèves doivent les concevoir eux-mêmes, en suggérant les paramètres à tester et la méthodologie à suivre. Concernant la question finale sur la chute des corps selon Galilée, les élèves sont invités à reformuler avec leurs propres mots ce qu'ils comprennent du dernier paragraphe du texte. Cette reformulation vise à vérifier s'ils établissent spontanément le lien entre la compensation des forces et le mouvement rectiligne uniforme.

Pour l'étude des lois de Kepler, les questions 1 et 3 de l'activité initiale sont posées sous la forme de questions ouvertes. Les élèves doivent ainsi identifier et extraire eux-mêmes les informations pertinentes de la vidéo, sans l'aide d'un cadre prédéfini comme un QCM. Ainsi, les élèves s'approprient davantage le contenu du support utilisé en travaillant sans indice explicite. Cette approche encourage la réflexion critique, développant leur démarche de recherche, leurs compétences d'analyse et de synthèse. Enfin, cela offre un défi aux élèves qui se sentent plus à l'aise avec le contenu du cours. Chaque élève progresse ainsi à son rythme, selon ses besoins mais en progressant vers l'objectif global de la séance.

Une alternative pour la seconde partie de l'activité aurait consisté à initier les élèves à une méthodologie de prise de notes à partir des vidéos, par exemple en collaboration avec les

professeurs de langue vivante, qui ont l'habitude d'employer cette approche. Cette démarche aurait permis de proposer à l'ensemble des élèves des questions ouvertes pour les items 1 et 3, tout en utilisant la version QCM comme support différencié, facilitant ainsi un accompagnement adapté au cours de la séance.

Les objectifs pédagogiques et scientifiques de cette activité sont les suivants :

- Développer l'esprit critique.
- Comprendre et identifier les principes fondamentaux qui régissent la chute des corps et le mouvement des planètes.

Les compétences du socle commun mobilisées par cette activité sont les suivantes :

- Identifier des questions de nature scientifique.
- Proposer une ou des hypothèses pour répondre à une question scientifique. Concevoir une expérience pour la ou les tester.
- Interpréter des résultats expérimentaux, en tirer des conclusions et les communiquer en argumentant.
- Effectuer des recherches bibliographiques.
- Lire et comprendre des documents scientifiques.
- S'exprimer à l'oral lors d'un débat scientifique.

4.3.4. Deuxième activité d'histoire des sciences.

Cette activité constitue la troisième étape du chapitre, intitulée « L'interaction gravitationnelle » (Annexe 10). Elle est structurée en deux parties principales. Dans la première partie, les élèves travaillent sur les trois lois du mouvement. Dans la seconde, ils élaborent l'expression de la force d'interaction gravitationnelle.

Cette activité s'appuie sur l'analyse de différents extraits des Principes mathématiques de la philosophie naturelle²⁵, publiés en 1687. Nous utilisons ici la traduction réalisée par Émilie du Châtelet. Comme pour l'activité précédente, nous proposons à un élève de lire l'introduction puis à trois autres de lire les énoncés des lois de Newton. Un point vocabulaire fait suite à cette étape. Les élèves sont ensuite invités à reformuler (en autonomie) les trois lois du mouvement avec leurs propres mots, afin de s'approprier leur signification. Cette phase est

²⁵ Newton I. Principia [Texte imprimé] : principes mathématiques de la philosophie naturelle. 2e tirage corrigé. Dunod; 2006.

suivie d'une séance d'institutionnalisation, au cours de laquelle l'enseignant propose une formulation moderne des lois ainsi qu'une illustration concrète pour chacune d'elles.

Cette approche permet non seulement de contextualiser les notions dans leur cadre historique, mais aussi de guider les élèves vers une compréhension claire et actuelle des lois fondamentales de la mécanique classique.

Pour le principe d'inertie, nous proposons la formulation suivante : « Un objet reste immobile ou en mouvement rectiligne uniforme, à moins qu'une force extérieure n'agisse sur lui pour modifier son mouvement. ». Nous proposerons deux approches complémentaires pour illustrer ce principe. Dans un premier temps, les élèves visionneront une vidéo montrant un satellite parcourant une petite portion de son orbite. Ils réfléchiront collectivement sur le mouvement de l'objet afin d'analyser ses caractéristiques. Une difficulté pour les élèves sur cette étape sera sûrement de considérer que le satellite est trop éloigné de la Terre pour considérer l'attraction terrestre. Dans un second temps, une situation d'équilibre statique sera illustrée à l'aide d'un dynamomètre et d'une masselotte. Le professeur réalisera au tableau le calcul de la norme de la force de rappel exercée par le ressort, en démontrant son égalité avec la norme du poids de la masselotte suspendue. Grâce à ces deux approches, les élèves seront amenés à explorer les deux cas du principe : le mouvement rectiligne uniforme et l'état de repos, ce dernier étant un cas particulier de mouvement rectiligne uniforme.

Pour le second principe, nous proposons la formulation suivante : « Une force résultante exercée sur un objet entraîne une variation de son mouvement. De plus, l'accélération produite et la force résultante ont la même orientation. ». Ici nous proposons une simple expérience avec un élève volontaire. Nous lui demandons d'appliquer une force quelconque sur un objet de faible masse, initialement immobile. Dans un second temps, l'élève doit appliquer la même force sur un objet de masse supérieure. Cela permet d'observer la modification du mouvement en fonction de la direction et du sens de la force mais aussi de commencer à réfléchir sur la relation entre la force appliquée, la masse de l'objet et la modification de son mouvement. Une difficulté possiblement rencontrée ici par les élèves pourrait être la notion de force résultante.

Enfin, pour le principe des action réciproques, nous proposons la formulation suivante : « Lorsqu'un corps A exerce une force sur un corps B, le corps B exercera une force sur le corps A de même grandeur, mais dans le sens opposé. ». Une illustration possible de ce principe est la suivante : le professeur monte sur une planche à roulette et jette un sac avec une force suffisamment importante pour observer un recul. Les élèves peuvent ainsi visualiser la force exercée par le sac sur le professeur. Avec l'expérience précédente, il leur est plus aisé de comprendre que l'effet de la même force sur le professeur (de masse supérieure) est

moindre. Nous pouvons également proposer aux élèves une vidéo de décollage d'une fusée, une représentation classique du principe d'action-réaction.

Après avoir consolidé les bases de la mécanique classique en approfondissant les trois lois du mouvement, nous abordons la loi de la gravitation universelle avec davantage de sérénité. Cette étude repose, là encore, sur deux extraits des *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* de Newton : les propositions VII et VIII. La proposition VII permet d'indiquer à l'élève que la force d'interaction gravitationnelle est proportionnelle à la masse de chacun des deux corps en interaction. La proposition VIII, quant à elle, permet de faire prendre conscience à l'élève que cette même force est inversement proportionnelle au carré de la distance entre les centres des deux corps.

Pour renforcer la compréhension de ces principes, nous élaborons un schéma représentant la situation. Ce support visuel aide particulièrement les élèves rencontrant des difficultés pour se représenter mentalement les interactions dans l'espace. Les données nécessaires, telles que la masse des corps et la distance entre eux, sont standardisées par des notations imposées, garantissant une base commune de travail pour tous les élèves.

Nous proposons enfin une forme incomplète de l'expression scalaire de la force de gravitation universelle dans laquelle les élèves doivent implémenter les données du problème à partir des propositions de Newton. Faire travailler les élèves sur l'élaboration de la formule les incite à s'appropriier le texte scientifique de Newton et à devenir acteur de leur apprentissage. Ce travail leur permet d'assimiler le concept tout en développant leurs compétences d'analyse et de raisonnement.

Les objectifs pédagogiques et scientifiques de cette activité sont les suivants :

- Établir et comprendre l'expression littérale scalaire de la loi de gravitation universelle,
- Expérimenter des situations d'équilibre statiques,
- Relier la loi de gravitation à la notion d'interaction.

Les compétences du socle commun mobilisées par cette activité sont les suivantes :

- Interpréter des résultats expérimentaux, en tirer des conclusions et les communiquer en argumentant.
- Effectuer des recherches bibliographiques.
- Lire et comprendre des documents scientifiques.
- S'exprimer à l'oral lors d'un débat scientifique

4.3.5. Activité expérimentale

Après avoir étudié la loi de la gravitation universelle, nous approfondissons la notion de force de pesanteur, qui constitue un cas particulier de la force d'interaction gravitationnelle. Dans ce cadre, nous proposons aux élèves une séance de travaux pratiques s'appuyant sur une démarche d'investigation expérimentale (Annexe 11). Cette séance prend la forme d'une tâche complexe mobilisant plusieurs compétences des élèves, en lien avec les domaines du socle commun de connaissances, de compétences et de culture. Ces compétences sont explicitement mentionnées dans l'en-tête du document pour informer les élèves des objectifs de l'activité. Les compétences sont les suivantes :

- Proposer une ou des hypothèses pour répondre à une question scientifique.
- Concevoir une expérience pour la ou les tester.
- Interpréter des résultats expérimentaux, en tirer des conclusions et les communiquer en argumentant.
- Développer des modèles simples pour expliquer des faits d'observations et mettre en œuvre des démarches propres aux sciences.
- Concevoir et réaliser un dispositif de mesure ou d'observation.
- Réaliser / Utiliser un graphique.
- Utiliser la proportionnalité.

La séance débute par une introduction succincte, qui contextualise le poids comme une manifestation particulière de la force d'interaction gravitationnelle. Une question préliminaire invite les élèves à revoir la distinction entre les grandeurs poids et masse. Ils doivent définir chacune de ces grandeurs, préciser l'instrument de mesure, l'unité correspondante et son symbole. Une liste de mots est fournie pour guider les élèves, favorisant ainsi un rappel structuré des notions clés. Le support fourni suit les étapes classiques de la démarche d'investigation. Les élèves, déjà familiarisés avec cette méthode grâce à une fiche méthodologique vue en début d'année, bénéficient d'un cadre clair pour réaliser l'activité.

- Formulation de l'objectif : Les élèves doivent déterminer la relation entre le poids et la masse. (Objectif donné aux élèves).
- Élaboration de l'hypothèse : Cette étape est laissée à l'initiative des élèves, bien que le professeur puisse les orienter. Par exemple, en leur demandant si les grandeurs poids et masse évoluent proportionnellement ou inversement proportionnellement, tout en les encourageant à réfléchir à partir de la formule de la force d'interaction gravitationnelle vue précédemment.

- Proposition du protocole : À partir de la liste de matériel fournie et du matériel disponible en salle, les élèves conçoivent un protocole expérimental. Ce dernier est validé par le professeur avant toute manipulation. Une fois le protocole approuvé, les élèves réalisent un schéma expérimental et passent à la phase pratique.
- Collecte et exploitation des données : Les élèves consignent leurs résultats dans un tableau, puis tracent le graphique $P = f(m)$ sur une feuille de papier millimétré. Bien que l'utilisation d'un logiciel tableur-grapheur soit une option pertinente pour travailler les compétences numériques, le traçage manuel reste privilégié ici pour habituer les élèves à choisir l'orientation et l'échelle les plus adaptées à leur graphique.
- Analyse des résultats et interprétation : Une série de quatre questions guide les élèves dans l'interprétation des résultats :
 1. Allure de la courbe : Cette question amène les élèves à reconnaître une fonction linéaire. Si cette notion n'a pas encore été abordée en mathématiques, le professeur veille à l'explicitier.
 2. Relation qualitative : Les élèves concluent que les grandeurs poids et masse évoluent proportionnellement.
 3. Calcul de l'intensité de la pesanteur : En analysant le coefficient directeur de la droite obtenue, les élèves calculent une valeur approximative de g , attendue autour de 10 N/kg compte tenu de la précision des dynamomètres utilisés.
 4. Formule du poids : Enfin, les élèves aboutissent à la relation $P = m \times g$. Une analyse dimensionnelle est réalisée pour déterminer l'unité de l'intensité de la pesanteur.

Le professeur conclue l'activité en expliquant le concept d'intensité de pesanteur dont la démonstration formelle sera réalisée dans le cours. Cette étape permet de relier les résultats expérimentaux aux notions théoriques et d'assurer une appropriation solide des concepts par les élèves. Ce TP permet ainsi de consolider les acquis sur la distinction entre poids et masse, tout en illustrant le lien entre la gravitation universelle et les phénomènes observables dans le quotidien des élèves.

4.3.6. Support de cours.

Au fil des activités précédentes et de celle-ci, nous avons exploré l'ensemble des concepts indispensables à la compréhension des lois de la mécanique, conformément au programme de 3^e. Ces apprentissages posent également les bases solides pour les enseignements futurs.

Il est maintenant temps de récapituler ces notions au travers d'un cours synthétique (Annexes 12 et 13).

La première page du cours ne s'inscrit pas dans le cadre de cette séquence pédagogique spécifique. Elle constitue une introduction générale sur les notions fondamentales d'action, d'interaction et de force, en présentant leurs caractéristiques principales (point d'application, direction, sens et intensité).

La deuxième partie du cours : Interaction gravitationnelle et force de pesanteur, se découpe en deux sous-parties. La première présente la gravitation comme une interaction universelle entre deux objets possédant une masse. Cette interaction est modélisée par deux forces attractives à distance, ayant la même valeur, la même direction, mais des sens opposés. Un schéma illustratif, accompagné d'une légende détaillée, introduit les notations utilisées dans l'expression mathématique de cette force, notamment la masse des deux corps, leur distance et la constante gravitationnelle universelle.

Pour concrétiser cette notion, un schéma²⁶ illustrant l'interaction gravitationnelle entre la Terre et la Lune est proposé. Ce diagramme met en évidence les deux forces distinctes exercées : la force de la Terre sur la Lune et la force de la Lune sur la Terre. Il permet de souligner la nature interactive et symétrique de cette force, conformément au principe d'action-réaction de Newton.

La force de pesanteur, deuxième sous-partie, est ensuite définie comme un cas particulier de l'interaction gravitationnelle. Elle correspond à la force exercée par la Terre sur un objet, possédant une masse, situé à sa surface ou à proximité. Cette force est communément appelée "poids".

À partir de l'expression générale de la force d'interaction gravitationnelle, la formule $P = m \times g$ est démontrée en appliquant les conditions spécifiques de la pesanteur terrestre. Un schéma est utilisé pour rappeler les caractéristiques du poids (point d'application, direction, sens) ainsi que les notations et les valeurs numériques nécessaires à la démonstration.

Une fois la formule établie, un exemple est proposé pour calculer le poids d'un objet de masse donnée. Cela permet de relier théorie et pratique tout en consolidant la compréhension des élèves par un cas concret.

Le cours poursuit en présentant la formule générale de l'intensité de la pesanteur terrestre g , où g dépend de la masse et de la distance au centre de la Terre (le rayon de la Terre pour un

²⁶ Chap 8 La gravitation [Internet]. 2019 [cité 20 déc 2024]. Disponible sur: <https://physiquechimiestbruno.wordpress.com/3eme/chap-9-la-gravitation/>

objet situé à sa surface). Il est montré que cette intensité diminue à mesure que la distance entre l'objet et le centre de la Terre augmente. L'idée est de faire comprendre aux élèves que, bien qu'universelle, la force d'interaction gravitationnelle devient négligeable à très grande distance (nous pouvons ainsi faire référence à l'exemple précédemment étudié dans le cadre du principe d'inertie).

Pour élargir la portée de cette loi, un exemple est proposé dans le champ gravitationnel de Saturne. Ce cas pratique consiste à recalculer le poids d'un objet sur cette planète en repartant de l'expression générale de la force d'interaction gravitationnelle. L'objectif est double : démontrer l'universalité de cette force dans le cadre de la mécanique classique et familiariser les élèves avec l'idée qu'une même loi peut s'appliquer dans des contextes variés.

En conclusion, cette partie du cours réunit les concepts fondamentaux de l'interaction gravitationnelle et de la pesanteur, offrant ainsi une compréhension cohérente des forces en mécanique classique et posant des bases solides pour les études futures.

4.3.7. Evaluation formative : tâche complexe.

Enfin, nous proposons aux élèves un exercice (Annexe 14) sous la forme d'un problème ouvert. Il s'agit ici d'une tâche complexe. Les élèves doivent s'appropriier le sujet, en extraire toutes les informations nécessaires à la résolution du problème et mettre en œuvre une démarche de résolution de problème. Le format ouvert incite les élèves à organiser eux-mêmes leur démarche, à planifier les étapes de résolution et à gérer leurs calculs. Cet exercice vise à évaluer non seulement la maîtrise des notions théoriques, mais aussi la capacité des élèves à les mobiliser de manière contextualisée. En leur demandant de résoudre un problème ouvert, l'objectif est de les placer dans une situation où ils deviennent acteurs de leur apprentissage. Cette approche développe leur esprit critique et leur capacité à gérer des informations variées tout en renforçant leur compréhension de la gravitation comme une loi universelle.

Cet exercice a donc pour objectif de réinvestir l'ensemble des notions vues en cours, en partant une fois de plus de l'interaction gravitationnelle de Newton comme loi universelle afin de l'appliquer dans un cas particulier, exactement comme pour le poids sur Terre. En manipulant des concepts déjà vus (poids, interaction gravitationnelle), ils réalisent que les lois de Newton s'appliquent dans une grande variété de contextes, favorisant une vision unifiée de la mécanique classique.

L'exercice place les élèves dans une situation contextualisée : le rôle d'ingénieur de la NASA chargé de concevoir une sonde, Voyager 3, destinée à survoler Neptune. Cette contextualisation scientifique, l'utilisation d'une mission spatiale, capte l'attention des élèves,

suscitant curiosité et motivation en liant les notions de mécanique classique à une application concrète et captivante, tout en proposant une problématique proche du monde scientifique.

Les objectifs scientifiques et pédagogiques de cet exercice sont multiples :

- Comprendre et appliquer la loi de l'interaction gravitationnelle pour calculer la force exercée entre deux objets (ici Neptune et Voyager 3).
- Approfondir la notion de force gravitationnelle à l'échelle astronomique.
- S'approprier les étapes de résolution d'un problème scientifique en mécanique.
- Manipuler des grandeurs physiques avec leurs unités : masse (kg), distance (m), force (N).
- Favoriser l'autonomie des élèves dans la résolution de problèmes complexes.
- Avoir un regard critique sur les résultats et valider ou non une hypothèse.

Les élèves mobilisent leurs connaissances et doivent utiliser la formule de la force d'interaction gravitationnelle en intégrant correctement les valeurs données (masse de Neptune, masse des instruments, distance). Ils doivent aussi comprendre la notion de force maximale que peut supporter le bras métallique. L'élève est alors confronté à une double tâche : effectuer des calculs précis pour déterminer la force gravitationnelle exercée sur Voyager 3 et interpréter si cette force excède la limite supportable par le bras métallique.

En conclusion, cet exercice est une activité, qui se veut stimulante, permettant aux élèves de relier la théorie de la gravitation universelle à une application pratique et concrète. Il favorise à la fois la mobilisation des connaissances et le développement de compétences transversales essentielles dans une démarche scientifique.

4.3.8. Evaluation sommative.

Nous proposons à présent une évaluation sommative (Annexe 15) afin de clôturer cette séquence. Étant donné que les élèves passeront le brevet en fin d'année scolaire, il me semble essentiel de les y préparer efficacement. L'évaluation reprend donc le format de l'épreuve du DNB : une durée de 30 minutes, et environ 6 à 9 questions reposant sur une étude documentaire et la mobilisation des connaissances des élèves. Bien que les sujets de brevet mélangent généralement plusieurs chapitres, nous avons ici choisi de nous concentrer exclusivement sur cette séquence pour les besoins de ce travail. Pour concevoir cette évaluation, je me suis appuyée sur un sujet²⁷ de brevet blanc trouvé en ligne, que j'ai ensuite

²⁷ <https://www.c-physique.fr/wp-content/uploads/2021/05/Brevet-Blanc-Janvier-2018.pdf>

adapté en fonction des objectifs pédagogiques de la séquence, tout en respectant la structure de l'épreuve officielle.

Cette évaluation recouvre plusieurs objectifs :

- Mobiliser les connaissances fondamentales du chapitre et vérifier leur bonne compréhension. Pour cela, les élèves devront comprendre la nature du mouvement de l'ISS et ses caractéristiques, expliquer l'influence de la force gravitationnelle sur les objets en orbite et relier la force de gravité à des phénomènes terrestres et spatiaux.
- Développer les compétences scientifiques. En effet, dans le but d'expliquer un phénomène en s'appuyant sur des arguments physiques, les élèves devront mobiliser différentes compétences qui seront évaluées telles que : réaliser/utiliser un schéma, lire et comprendre des documents scientifiques, effectuer un calcul et enfin exprimer un résultat (grandeur et unité).
- Evaluer la capacité à résoudre des problèmes : nous demandons ici d'appliquer la formule de la force gravitationnelle à un cas réel, en utilisant les données des documents, de comparer des concepts comme poids et masse dans différents contextes (Terre, Lune, ISS) mais aussi de vérifier la vitesse de l'ISS à partir des informations données.

Afin de motiver les élèves pour cette évaluation j'ai choisi une contextualisation concrète et proche de celle proposée pour l'activité « Voyager 3 ». En effet, la mission Alpha de l'ISS constitue un cadre réel et d'actualité, utilisant une personnalité connue et appréciée des élèves. Cette approche permet de favoriser l'engagement des élèves en leur montrant l'application des notions étudiées au cours de la séquence et en valorisant une ouverture disciplinaire sur l'astronomie.

L'objectif est ici de proposer une alternance de types de questions, équilibrant connaissances, raisonnement et calculs. L'évaluation intègre ainsi des questions qualitatives (sur la forme de la trajectoire et la nature de l'interaction), quantitatives (calculs de vitesse, poids et force) ainsi que des exercices de modélisation (schéma des forces). Cette diversité permet d'évaluer plusieurs dimensions de la compréhension et d'éviter que les élèves ne se limitent à une simple restitution de formules. De plus, en variant les compétences sollicitées, chaque élève a l'opportunité de réussir en mobilisant ses points forts. Cette approche favorise également une progression méthodique, en réinvestissant progressivement les compétences acquises, notamment sur :

- La description du mouvement (trajectoire, évolution de la vitesse)

- Les aspects mathématiques (calcul du périmètre, formule de la vitesse, calcul de la force d'interaction gravitationnelle et du poids, loi de proportionnalité pour l'échelle)
- L'interprétation de la force gravitationnelle (en termes de nature de l'interaction) et sa représentation graphique (modélisation)

Enfin, nous évaluons ici les compétences du socle commun, compétences indiquées aux élèves dans le tableau en introduction de l'évaluation.

Domaine du socle		Compétences travaillées	I	F	S	TB
1,3	Pratiquer des langages	Réaliser / Utiliser un schéma.				
		Lire et comprendre des documents scientifiques.				
		Effectuer un calcul				
		Exprimer un résultat (grandeur et unité)				

Figure 2 : tableau d'évaluation des compétences.

Cette évaluation a pour objectif de préparer les élèves au diplôme national du brevet, de vérifier leur compréhension des concepts étudiés au cours de la séquence et d'apporter un regard critique sur la progression pédagogique mise en place. En effet, l'analyse des résultats pourrait mettre en évidence la persistance de certaines conceptions initiales, ou bien encore l'apparition de nouvelles.

5. Analyse a posteriori.

Après avoir conçu et mis en œuvre la séquence pédagogique présentée dans ce mémoire, il semble essentiel de prendre du recul afin d'évaluer son efficacité et d'en identifier les axes d'amélioration. Cette analyse a posteriori repose sur l'observation des difficultés rencontrées par les élèves lors de la mise en pratique, ainsi que sur l'examen des causes sous-jacentes. Elle vise à proposer des stratégies de remédiation permettant d'optimiser la séquence et de mieux répondre aux besoins des élèves. Dans cette partie, nous examinerons ces difficultés, pour en comprendre les origines et envisager des ajustements susceptibles d'améliorer l'apprentissage au cours de cette séquence.

5.1. Evaluation diagnostique.

Afin d'introduire cette séquence, nous avons proposé un questionnaire diagnostique aux élèves. Celui-ci a été distribué en fin de séance (pour pouvoir être analysé avant le début de la séquence lors de la séance suivante), en précisant que les réponses resteraient anonymes afin de leur permettre d'exprimer librement leurs idées, sans crainte d'être jugés ou notés. Les élèves disposaient d'environ vingt minutes pour répondre, garantissant ainsi un temps suffisant pour assimiler les énoncés et mener une réflexion approfondie sur les questions posées.

La première question, « *Selon vous, quelle est la raison pour laquelle un objet tombe lorsqu'on le lâche ?* », visait à identifier les conceptions initiales des élèves concernant la gravité terrestre.

Sur 26 élèves :

- 10 élèves ont mentionné la gravité comme cause de la chute des objets, certains précisant « gravité terrestre », sans autre explication. Ces réponses indiquent une reconnaissance intuitive du concept, mais sans véritable compréhension du mécanisme sous-jacent.
- 7 élèves ont évoqué l'attraction exercée par le « centre de la Terre », sans utiliser le terme de gravité. Cela témoigne d'une première compréhension du phénomène d'attraction, bien qu'encore imprécise, et laisse entrevoir la notion de centre de masse, qui pourra être approfondie en cours.
- 5 élèves ont donné une réponse plus complète du type : « *C'est grâce à la gravité terrestre qui attire les objets vers le centre de la Terre* ». Ces élèves semblent avoir une compréhension plus avancée du phénomène, en mobilisant les notions de gravité et de direction du mouvement.

- 1 élève a mentionné la notion de force en expliquant : « *Quand on lâche un objet, une force s'exerce sur lui et il est attiré par le centre de la Terre* ». Cette réponse est intéressante, car elle introduit la notion d'interaction, mais laisse penser que la force n'agit que lorsque l'objet est lâché, ce qui nécessitera une clarification en cours.
- 1 autre élève a attribué la chute des objets à leur masse (« *C'est parce qu'il possède une masse* »), une idée pertinente qui pourra être reliée à la seconde loi de Newton.

Enfin, quelques réponses erronées ou incomplètes révèlent des conceptions alternatives :

- « *Un objet tombe car il n'a aucune gravité* » : cette formulation sous-entend que tous les corps n'exercent pas forcément de force d'attraction.
- « *C'est parce que rien ne tient l'objet* » : bien que cette réponse ne soit pas fausse, elle manque de précision et devra être reformulée en termes de forces en jeu.

Les questions 2 et 3 portaient sur la relation entre la masse d'un corps et sa vitesse de chute, permettant d'évaluer si les élèves font spontanément la distinction entre poids et masse.

Question 2 : « Si vous laissez tomber simultanément deux boules de même forme mais de masses différentes depuis la même hauteur, laquelle atteindra le sol en premier ? » :

- 4 élèves ont correctement répondu que les deux boules toucheraient le sol en même temps, bien qu'un élève ait attribué cette observation à la forme des objets plutôt qu'à l'indépendance de la chute vis-à-vis de la masse.
- 2 élèves ont pensé que la boule la plus légère toucherait le sol en premier (« *elle ira plus vite* »), ce qui traduit une confusion avec l'inertie, suggérant que les objets plus légers seraient plus faciles à mettre en mouvement.
- Tous les autres élèves ont répondu que la boule la plus lourde toucherait le sol en premier, souvent en justifiant par le poids plus important de l'objet. Cette erreur sera corrigée en introduisant la seconde loi de Newton, qui permettra de lever cette confusion.

La question 3 permet également de vérifier l'intuition des élèves quant à la résistance du milieu : « Si vous laissez tomber simultanément une balle et une feuille de papier depuis la même hauteur, quel objet touchera le sol en premier ? Pourquoi ? » :

- 1 élève n'a pas répondu à la question.
- Pour 1 élève, les deux objets toucheront le sol en même temps, sachant qu'il avait répondu la même chose à la question précédente. Pour cet élève, la vitesse moyenne de chute des corps ne dépend donc ni de la masse des corps, ni de leur forme. Le

phénomène serait donc universel et identique pour tous les corps. Ici aussi, la seconde loi de Newton permettra de clarifier la situation.

- 3 élèves ont répondu que la feuille toucherait le sol en premier car elle était plus légère tandis que seulement 2 de ces trois élèves avaient eu la même réflexion pour la question précédente. Pour ces deux élèves, seule la masse de l'objet intervient dans sa vitesse de chute.
- Les autres élèves ont correctement identifié que la balle toucherait le sol en premier, mais 15 d'entre eux ont justifié cette réponse par la masse plus importante de la balle, reprenant ainsi leur raisonnement de la question précédente. Or, la question ne présente aucune indication sur le poids ou la masse des différents objets mais naturellement, les élèves font le parallèle avec la question précédente sans observer les paramètres mis en jeu pour l'expérience. Nous retrouvons donc la même conception. Pour les 8 autres élèves, c'est bien « la résistance de l'air » qui agit sur le temps de chute de la feuille et la « ralentie ». Certains élèves ont même développé leur réponse en expliquant que du fait de la planéité de la feuille, l'air exerçait une force plus importante sur l'objet. Pour ces élèves, la réalisation des expériences de l'activité 2 devrait confirmer leur pensée.

Ces réponses soulignent la nécessité de bien distinguer les effets de la gravité et ceux de la résistance de l'air, ce qui pourra être approfondi par des expériences pratiques en classe.

Les questions 4 et 5 explorent l'intuition des élèves sur la force gravitationnelle agissant à distance. Ici, l'objectif est de faire ressortir les conceptions initiales des élèves mais si ce questionnaire prend comme objectif d'amener les élèves vers la bonne réponse physique, il serait sûrement plus pertinent d'inverser les questions 4 et 5 ce qui permettrait de mettre les élèves sur la bonne voie pour répondre à la question 5.

La question 4 a pour énoncé « D'après vous, pourquoi les planètes tournent autour du Soleil ? ». 6 élèves n'ont pas répondu à la question, révélant une difficulté à formuler une explication.

Quelques élèves ont donné des explications variées. Par exemple, un élève propose « il y a le vide donc pas de force entre les planètes et le Soleil ». Pour cet élève, le fait qu'il y ait du vide impose qu'il ne peut y avoir de force qui s'applique. Ou encore « Les planètes ont besoin du Soleil ». Il s'agit là d'une réponse typiquement anthropomorphique. Aussi, « Parce qu'il y a un pôle magnétique ». Pour cet élève, le mouvement des planètes serait régi par la présence d'un champ magnétique qui influencerait le mouvement des planètes. Enfin, « Parce qu'elles sont en orbite », ici l'élève répond à la question par la question.

Pour les autres élèves, si les planètes tournent autour du Soleil c'est grâce à une force exercée par le Soleil. Les élèves utilisent la formulation suivante en majorité « Car les planètes sont attirées par le Soleil » ou bien « C'est grâce à la gravité du Soleil ». Parmi eux, 2 élèves proposent « il y a des forces entre le Soleil et les planètes mais elles n'ont pas la même intensité ». Et 3 élèves ajoutent à leur réponse « mais je ne sais pas pourquoi elles font un mouvement circulaire ». Ainsi, pour ces élèves, il y a bien une force agissant à distance entre le Soleil et les planètes. Pour 2 d'entre eux, la notion d'interaction apparaît et enfin certains vont plus loin dans leur raisonnement et s'interroge sur l'effet de ces forces sur la trajectoire des planètes, une question clé qui sera abordée qualitativement en expliquant la balance entre attraction gravitationnelle et mouvement inertiel.

La question 5 quant à elle est plus directe « Pensez-vous qu'une force puisse s'exercer entre deux objets sans contact direct ? Si oui, pouvez-vous donner un exemple ? ». 2 élèves n'ont pas répondu à cette question. Pour 2 autres élèves, non il n'est pas possible d'exercer une force à distance sur un objet, mais ils ne fournissent pas plus d'explication pour justifier leurs réponses. Pourtant, si nous observons les réponses de ces élèves aux questions 2 et 3, les deux élèves ont justifié la chute des corps par la gravité. Il y a donc une incohérence entre ces réponses qui témoigne soit d'une mauvaise compréhension du phénomène, soit d'une réponse conditionnée concernant la gravité. Pour tous les autres élèves, une action à distance est possible. La majorité d'entre eux propose la force magnétique comme exemple en répondant « par exemple deux aimants s'attirent sans se toucher ». Un élève cite la force exercée par la Lune, responsable des marées, les autres élèves citent la gravité (entre un corps et la Terre ou entre le Soleil et la Terre).

Les questions 6 et 7 quant à elles permettent de vérifier si les élèves font bien la distinction entre le poids et la masse. Pour la question 6 : « Selon vous, pourquoi ressentez-vous votre poids lorsque vous êtes debout sur Terre ? » : 6 élèves n'y ont pas répondu. Un élève a répondu que « la gravité nous poussait vers le sol ». Dans cette réponse, l'élève mobilise bien la notion de gravité, mais la décrit à tort comme une force qui nous pousserait vers le sol, révélant ainsi une confusion sur son mode d'action. Tous les autres élèves expriment correctement l'idée que notre poids résulte de l'attraction exercée par la Terre. Ici, nous nous serions attendus à obtenir des réponses impliquant la masse de nos corps mais les élèves ont utilisé la notion de poids à bon escient.

Au regard des réponses précédentes qui révèlent que les élèves associent très souvent la gravité uniquement à la Terre, la question 7 va nous permettre de faire le point sur cette idée. L'énoncé est le suivant : « Votre poids serait-il différent sur la Lune ? Pourquoi ? ». 3 élèves n'ont pas répondu à cette question. Certaines réponses me semblent cependant intéressantes :

- « Notre poids ne sera pas différent sur la Lune mais nous ressentirons comme si on pèse moins car il y a l'apesanteur » : pour cet élève l'intensité de la pesanteur n'influence pas le poids mais seulement le senti. De plus, l'élève extrapole l'intensité de la pesanteur faible sur la Lune au phénomène d'apesanteur.
- « Non notre poids sera toujours le même mais pas la gravité » : ici également, le poids n'est pas lié à la gravité et à l'intensité de la pesanteur.
- « Notre poids ne sera pas différent mais la masse oui » : nous avons ici une inversion des propriétés de la masse et du poids. Pour cet élève notre poids est inhérent au corps mais notre masse dépend des conditions extérieures.
- « Oui car la pression sur la Lune est plus faible que sur la Terre » : ici nous observons une confusion entre les phénomènes de pression et de gravité. Nous retrouvons une conception initiale précédemment citée : pour l'élève c'est la pression atmosphérique qui nous pousse vers la surface de la Terre.
- « Oui car le noyau de la Lune est plus petit » : ici, nous voyons que la taille de la Lune rentre en jeu dans le calcul du poids, une idée qui sera explicitée avec la formule de la force de gravitation universelle.

Pour ces différentes réponses, la démonstration de la formule du poids à partir de la formule de la force d'interaction gravitationnelle devrait permettre de clarifier ce sujet.

Il est également intéressant de noter que deux élèves pensent que la gravité sur la Lune est plus forte que sur Terre. Bien que cette réponse révèle une inversion des ordres de grandeur, elle témoigne néanmoins d'une compréhension correcte du fait que l'intensité de la pesanteur dépend des corps en présence.

Enfin, la question 8 nous permet d'évaluer les prérequis des élèves quant à l'universalité de la mécanique newtonienne. L'énoncé est le suivant « Pensez-vous que les mêmes lois expliquent à la fois la chute des objets sur Terre et le mouvement de la Lune autour de la Terre ? Pourquoi ? ».

- 13 élèves n'ont pas répondu à la question.
- 6 élèves estiment que les lois régissant les mouvements des corps ne sont pas les mêmes, en justifiant leur réponse soit par la différence de gravité, soit par la différence de masse entre la Terre et la Lune. Deux d'entre eux n'ont cependant apporté aucune justification.
- Les autres élèves ont répondu par l'affirmative. Leurs justifications se répartissent en deux catégories : certains expliquent que « *la gravité est partout* », montrant ainsi qu'ils

perçoivent son universalité, tandis que d'autres avancent que « *la Terre attire tous les objets* », adoptant une vision plus géocentrée du phénomène.

L'analyse des réponses met en évidence plusieurs idées préconçues qu'il conviendra de corriger tout au long de la séquence :

- La confusion entre poids et masse.
- L'influence supposée de la masse sur la vitesse de chute.
- Une vision souvent géocentrée de la gravité.
- Des hésitations sur la notion d'interaction et d'action à distance.

Ce questionnaire nous offre donc une base précieuse pour adapter notre enseignement, en insistant sur les points de difficulté identifiés afin d'amener les élèves vers une compréhension plus rigoureuse des concepts étudiés.

5.2. Activité 2 : De la chute des corps au mouvement des planètes.

Une des premières difficultés rencontrées par les élèves au cours de cette activité a été l'appropriation du texte proposé. La lecture, réalisée collectivement, s'est avérée laborieuse notamment en raison d'un manque d'aisance dans la compréhension globale du texte. Ce problème s'est manifesté par une lecture hésitante, ponctuée de difficultés d'intonation et une gestion maladroite de la ponctuation, témoignant d'un défaut de compréhension du sens des phrases. Pour pallier cette difficulté, une stratégie de remédiation pourrait consister à anticiper cette étape en fournissant le texte aux élèves lors de la séance précédente. Cela leur permettrait de prendre le temps de le lire individuellement et de chercher la signification des mots ou expressions qu'ils ne comprennent pas. Une consigne pourrait être donnée pour qu'ils notent les termes difficiles et, si possible, en recherchent la définition dans un dictionnaire ou en ligne. Lors de la séance suivante, les élèves arriveraient avec une première lecture déjà effectuée et une appropriation préliminaire du texte.

Lors de l'analyse des deux premières questions sur le texte, qui étaient étroitement liées, les élèves ont su saisir l'essentiel des idées développées par Aristote et Galilée. Cependant, la formulation qu'ils ont proposée manquait parfois de rigueur dans l'utilisation du vocabulaire scientifique. La correction collective a permis, me semble-t-il, de clarifier et de trier les informations importantes, renforçant ainsi leur compréhension des concepts abordés.

Concernant la troisième question, certains élèves ont confondu la notion de résistance mécanique avec celle de résistance électrique. Cette confusion les a conduits à mobiliser leurs connaissances en électricité, ce qui les a amenés à proposer l'électricité statique comme

explication du phénomène évoqué dans la question. Afin d'éviter ce type de confusion à l'avenir, il serait pertinent, lors de la phase de clarification du vocabulaire en début de séance, de proposer un synonyme ou une reformulation du terme « résistance » utilisé dans le texte, comme « opposition mécanique » par exemple. Cette précision aiderait les élèves à mieux orienter leurs réflexions et éviterait qu'ils s'égarerent dans d'autres champs disciplinaires.

Pour la quatrième question, qui consistait à expérimenter en autonomie, les élèves se sont montrés particulièrement engagés. Ils ont spontanément essayé de reproduire les expériences proposées, certains en sollicitant du matériel disponible en classe, d'autres en utilisant des objets de leurs trousseaux. Cependant, les résultats obtenus lors de leurs manipulations n'ont pas correspondu aux résultats attendus. À ce stade de l'activité, les élèves étaient encore influencés par les idées d'Aristote et restaient convaincus qu'une différence significative entre les temps de chute des corps devait être observable. Les conditions expérimentales en classe ont parfois laissé apparaître de légères différences dans les temps de chute, renforçant leur adhésion à cette idée.

Pour remédier à cette situation, j'ai orienté leur réflexion sur les paramètres expérimentaux susceptibles d'être des sources d'erreurs. Les élèves ont eux-mêmes proposé des ajustements, comme augmenter la hauteur de chute pour « *observer un écart plus grand* » selon leurs dires. J'ai donc répété l'expérience depuis une hauteur plus importante, mais les résultats obtenus ont à nouveau infirmé l'hypothèse de Galilée aux yeux des élèves. En les guidant, je les ai amenés à considérer des détails cruciaux, comme la position de mes bras au moment du lâcher des objets, et à utiliser la réponse à la question précédente. Ces discussions ont permis de démontrer progressivement que c'est bien l'idée de Galilée, et non celle d'Aristote, qui s'avérait conforme à la réalité. Une fois cette étape franchie, la cinquième question a été résolue sans difficulté particulière.

Pour la dernière question portant sur le texte de Galilée, les élèves ont rencontré davantage de difficultés. Afin de les accompagner, j'ai réalisé un schéma au tableau illustrant la compensation des forces, en m'appuyant sur le modèle de la force que nous avons déjà abordé en classe. Ce support visuel a facilité leur compréhension et les a aidés à construire une réponse.

La deuxième partie de l'activité, axée sur les lois de Kepler, s'est révélée plus accessible pour les élèves. Ce sujet a suscité un vif intérêt, les incitant à poser de nombreuses questions sur le mouvement des planètes. Cette curiosité les a conduits à explorer des sujets connexes en physique.

Enfin, concernant le dernier paragraphe de l'activité, qui évoquait la légende de la pomme et les travaux de Newton, les élèves ont rapidement souligné qu'ils savaient qu'il s'agissait d'un mythe. Cette remarque a ouvert une discussion sur le contexte historique de sa découverte, ce qui a une fois de plus enrichi les échanges mais a également contribué à prolonger la séance au-delà du temps imparti.

5.3. Activité 3 : L'interaction gravitationnelle.

Cette activité a également mis en lumière des difficultés liées à la lecture et à la compréhension du texte proposé. Comme pour l'activité précédente, il serait judicieux de mettre en place une remédiation similaire : fournir le texte aux élèves à la séance précédente afin qu'ils puissent effectuer une première lecture en autonomie. Cette anticipation leur permettrait de s'approprier le vocabulaire avant l'activité, réduisant ainsi les blocages liés à des obstacles superficiels et leur permettant de se concentrer pleinement sur les concepts scientifiques abordés en classe.

Concernant la reformulation des principes de Newton, les élèves ont éprouvé des difficultés à entamer une réponse de manière autonome. En circulant parmi eux, j'ai constaté qu'ils peinaient à amorcer une réflexion, ce qui a nécessité une adaptation de ma part. J'ai opté pour une correction collective : nous avons procédé au découpage des énoncés des lois de Newton en segments plus courts et accessibles. Pour chaque fragment, j'ai sollicité un élève pour qu'il exprime, avec ses mots, le sens qu'il attribuait à la phrase. Cette approche a facilité leur compréhension pas à pas. En parallèle, les illustrations mentionnées dans la partie 3 de ce dossier ont servi de supports pour ancrer les concepts dans des exemples concrets. Une fois ces étapes réalisées, j'ai fourni aux élèves les formulations modernes des principes, afin de leur permettre de mieux structurer leurs connaissances.

Dans la seconde partie de l'activité, la majorité des élèves a réussi l'exercice sans grande difficulté. Cependant, quelques points de blocage ont émergé :

- Premièrement, la compréhension des termes « proportionnelle » et « réciproquement » vis-à-vis de la formule mathématique. Ces notions ont posé un problème à certains élèves, qui n'arrivaient pas à les relier directement à la structure de la formule. J'ai donc repris une formule au tableau en m'appuyant sur les notions de numérateur et de dénominateur pour clarifier leur sens. Une amélioration pourrait consister à introduire ces termes lors du point vocabulaire, en proposant des synonymes ou des reformulations accessibles.
- Les élèves ont correctement associé « quantité de matière » à la masse des corps. Cependant, je m'interroge sur le risque de confusion à leur entrée au lycée. En effet, le concept de "quantité de matière" est utilisé en chimie avec une signification

différente, ce qui pourrait entraîner des malentendus futurs. Une clarification préalable ou une mise en garde explicite pourrait être envisagée pour éviter toute ambiguïté à l'avenir.

- Enfin, il y a eu une confusion autour des notations utilisées. Bien que la notation ait été explicitée dans le texte accompagnant le schéma, certains élèves ont semblé confondre ces lettres avec la désignation des points dans un repère mathématique. Cette confusion pourrait être due à la position des lettres sur le schéma, accolées aux croix représentant les centres des sphères. Pour y remédier, il serait utile de revoir la disposition des annotations sur le schéma ou de prendre le temps de les expliquer explicitement lors de la présentation en classe.

Ces observations montrent que, bien que globalement réussie, cette activité pourrait être optimisée en apportant des ajustements spécifiques pour mieux accompagner les élèves dans leur compréhension des notions abordées. Enfin, cette activité a permis de consolider les acquis des élèves tout en identifiant des points de vigilance pour prévenir des confusions ultérieures.

5.4. Activité expérimentale.

Nous passons à présent à une séance de travaux pratiques portant sur la relation entre le poids et la masse. L'objectif est d'amener les élèves à établir eux-mêmes l'expression mathématique de cette relation, en s'appuyant sur leurs connaissances des notions de proportionnalité. Sur le plan organisationnel, la classe, composée de 30 élèves, est répartie en 10 groupes de trois, disposant de 1h30 pour mener les expérimentations.

Après une introduction au TP expliquant que le poids est un cas particulier de la force d'interaction gravitationnelle, les élèves disposent de cinq minutes en autonomie pour travailler sur un exercice visant à clarifier la distinction entre poids et masse. Pendant cette phase, je circule dans la salle afin d'observer leur progression et d'apporter un soutien aux élèves en difficulté. Parmi les 30 élèves présents, 4 ont confondu la force avec la grandeur associée à la quantité de matière. En les aidant à faire le lien avec une situation du quotidien, comme la mesure du poids sur une balance, et en leur présentant le matériel expérimental, ils ont pu rectifier leur compréhension et associer correctement les notions.

Afin de m'assurer que tous les élèves s'engagent dans le TP sans confusion préalable, nous débutons par une phase de mise en commun et d'institutionnalisation. Une fois l'objectif du TP présenté, les élèves sont invités à formuler une hypothèse en autonomie. Cependant, j'ai rapidement constaté qu'ils rencontraient des difficultés à cette étape, ne comprenant pas précisément ce qui était attendu.

Pour les guider, je les ai d'abord orientés vers la fiche ressource distribuée en début d'année, « *Comment rédiger un compte rendu d'expérience* », où la formulation d'une hypothèse et son principe sont expliqués. Ensuite, j'ai jugé nécessaire de clarifier le terme *relation*, en précisant que l'objectif était d'établir une relation mathématique. Cette précision a permis à certains élèves d'évoquer spontanément la proportionnalité, ce qui a facilité la compréhension collective et aidé les autres à formuler leur propre hypothèse.

Une fois les hypothèses validées groupe par groupe, les élèves ont eu la liberté de proposer un protocole expérimental à partir du matériel mis à leur disposition. Tous les groupes ont réussi à rédiger leur protocole assez rapidement, bien que certaines formulations aient nécessité des ajustements, notamment en veillant à l'emploi des verbes à l'infinitif. Il en a été de même pour le schéma de l'expérience : scientifiquement correct dans tous les cas, mais parfois perfectible dans sa présentation (manque de rigueur dans les tracés ou excès de détails superflus).

Lors de la mise en œuvre, tous les élèves ont réussi à effectuer les mesures attendues. Concernant la présentation des résultats sous forme de tableau, j'ai simplement insisté sur l'importance des chiffres significatifs, bien que ce point ne soit pas essentiel au regard de l'objectif principal de la séance.

La principale difficulté rencontrée par les élèves a été la construction de la courbe représentant le poids en fonction de la masse de l'objet. Seuls deux groupes sur dix ont réussi à choisir une échelle adaptée. J'ai donc pris le temps de leur rappeler la méthode pour déterminer une échelle appropriée, en les guidant dans leur choix avant de les laisser finaliser leur graphique en autonomie.

Une fois les graphiques validés, nous passons aux questions. Afin de conclure le TP dans le temps imparti, je demande à un élève de lire chaque question à voix haute, tandis que les autres proposent leurs réponses de manière volontaire.

Les deux premières questions sont rapidement résolues par les élèves, qui observent que la courbe obtenue est une droite, indiquant ainsi une relation de proportionnalité entre le poids et la masse. En revanche, les questions 3 et 4 leur posent davantage de difficultés, et aucun groupe ne parvient à formuler une réponse. Pour les aider, je les guide dans le calcul du coefficient de proportionnalité, leur permettant ainsi d'aboutir à l'expression mathématique de la relation : $P = m \times g$.

Pour améliorer cette séance, il serait pertinent de proposer une version différenciée en apportant des aides ciblées, notamment pour l'élaboration de l'hypothèse. Une première adaptation consisterait à préciser davantage l'objectif en intégrant explicitement le terme *mathématique* et en mentionnant directement les deux grandeurs dans l'énoncé. Ainsi,

l'objectif de l'expérience pourrait être reformulé comme suit : « *Déterminer la relation mathématique entre le poids P et la masse m* ».

Une autre piste d'accompagnement pourrait être de fournir une formule à compléter, avec chaque grandeur placée de part et d'autre du signe $=$, afin de guider progressivement les élèves vers l'expression finale.

Concernant la réalisation du graphique et la phase de questionnement, il serait utile de proposer deux supports d'aide distincts : l'un rappelant la méthode pour choisir une échelle adaptée, et l'autre explicitant la notion de proportionnalité ainsi que la démarche pour calculer un coefficient de proportionnalité à partir d'un ensemble de données. Ces ajustements faciliteraient l'autonomie des élèves tout en leur offrant des repères clairs pour surmonter les principales difficultés rencontrées.

5.5. Séance de cours.

À l'issue de cette activité expérimentale, le cours a été distribué aux élèves. Nous l'avons ensuite parcouru ensemble, en laissant des élèves volontaires lire à voix haute et en complétant progressivement les définitions et démonstrations dans les espaces prévus à cet effet sur le document en annexe (Annexes 12 et 13).

La principale difficulté rencontrée à cette étape a concerné la démonstration mathématique de la formule du poids à partir de celle de la force d'interaction gravitationnelle. Pour faciliter sa compréhension, j'ai repris la démonstration à deux reprises en m'appuyant sur le schéma et les données de l'énoncé, en insistant particulièrement sur la signification des différentes grandeurs et notations utilisées.

5.6. Evaluation formative.

Nous proposons à présent aux élèves une évaluation formative sous forme de situation-problème. Cet exercice, donné à réaliser à la maison, leur permettait d'accéder à toutes les ressources disponibles. L'objectif était de s'assurer qu'ils avaient bien assimilé le fait que la force d'interaction gravitationnelle s'exerce entre tous les corps et qu'elle dépend uniquement de leurs masses ainsi que de la distance entre leurs centres.

Les résultats de cette évaluation sont très satisfaisants, avec une moyenne de 16,28/20. Cependant, il convient de nuancer cette performance en tenant compte du fait que l'exercice a été réalisé à la maison. Deux erreurs récurrentes ont été identifiées : des difficultés dans la conversion des masses (de grammes en kilogrammes) et des oublis dans le calcul de la distance d , notamment l'omission du rayon de Neptune ou de l'altitude de la sonde.

Pour éviter cette confusion, il aurait été pertinent de fournir un schéma similaire à celui utilisé dans l'évaluation finale, afin d'aider les élèves à mieux visualiser les grandeurs en jeu. En effet, jusqu'à présent, ils n'avaient appliqué la formule que dans le cas où l'objet étudié se trouvait à la surface de la planète. L'objectif de cette activité était justement d'évaluer leur capacité à interpréter correctement les termes de la relation et à les transposer dans un contexte différent, plutôt que de se limiter à une simple application mécanique de la formule.

Les résultats suggèrent qu'à ce stade de la séquence, les élèves ont bien assimilé le concept d'universalité de la force d'interaction gravitationnelle.

5.7. Evaluation sommative.

Cette évaluation est ici à titre indicatif, elle nous permet de vérifier que les élèves soient préparés au brevet, qu'ils aient bien compris l'utilisation de la formule de l'interaction gravitationnelle et son sens. La moyenne obtenue par les élèves à ce devoir est de 8,87/20.

La moyenne de classe étant inférieure à 10/20, intéressons-nous aux erreurs récurrentes.

Les deux premières questions ont été très bien réussies, seuls 5 élèves n'ont pas pu y répondre. Ici nous vérifions donc que les notions de trajectoire et d'évolution de la vitesse sont maîtrisées par la majorité des élèves.

La question 3 s'est révélée plus difficile pour les élèves, car elle sollicitait deux compétences distinctes. D'une part, des compétences mathématiques étaient nécessaires pour calculer le périmètre d'un cercle, ce qui impliquait de se souvenir de la formule correspondante. D'autre part, les élèves devaient être capables d'analyser l'énoncé et le schéma afin d'identifier correctement la valeur du rayon de l'orbite.

Bien que ce point ait été travaillé en amont grâce à l'évaluation formative, une grande majorité des élèves n'a pas perçu cette subtilité, ce qui a conduit à des erreurs récurrentes.

La question 4 reposait sur le résultat de la question 3. Bien que tous les élèves se soient souvenus de la formule de la vitesse, peu ont réussi à l'appliquer correctement. De plus, nombreux sont ceux qui ont utilisé une valeur de distance incorrecte, conséquence d'une erreur dans la question précédente, ce qui a impacté la justesse de leur réponse.

Pour la question 5, seuls trois élèves ont commis une erreur, tandis que tous les autres ont correctement identifié l'action à distance. Ce concept semble donc largement acquis au cours de la séquence.

Concernant la question 6, qui portait sur l'application de la relation, les erreurs observées sont similaires à celles relevées lors de l'évaluation formative. Elles concernent principalement des difficultés de conversion d'unités (de la tonne au kilogramme) ainsi que des oublis dans le

calcul de la distance entre les centres, notamment l'omission de l'altitude ou du rayon de la Terre.

La question 7 a été la plus difficile pour les élèves. Elle exigeait non seulement de représenter les forces en respectant la convention scientifique (point d'application, direction, sens), mais aussi d'utiliser correctement l'échelle fournie, de mobiliser le principe des actions réciproques et de rappeler la définition de l'interaction gravitationnelle : si la Terre attire l'ISS avec une certaine force, alors l'ISS exerce sur la Terre une force de même intensité mais de sens opposé. Enfin, il était essentiel d'associer correctement les notations aux vecteurs correspondants.

Si la majorité des élèves a su identifier la direction et le sens des forces, beaucoup n'ont pas tenu compte de l'échelle et ont inversé les notations $F_{T/ISS}$ et $F_{ISS/T}$. Pourtant, la représentation des forces avait été travaillée en première partie de cours à travers divers exercices et revue à plusieurs reprises dans cette séquence. Ce point de blocage, bien que surprenant, souligne la nécessité d'un renforcement sur l'usage des notations et de l'échelle dans les représentations vectorielles.

La question 8 portait sur la restitution des connaissances, les élèves devaient simplement rappeler la formule du poids. Globalement, cette question a été bien réussie. Les erreurs les plus fréquentes concernaient l'attribution incorrecte des unités, bien que la question suivante fournissait déjà un indice à ce sujet.

Quant à la question 9, elle consistait en une simple application de la formule. Les élèves ayant correctement répondu à la question précédente ont généralement réussi cet exercice. Toutefois, une erreur récurrente a été la mauvaise expression du résultat dans l'unité appropriée.

Enfin, la question 10, de nature ouverte, visait à évaluer la compréhension des élèves sur deux aspects : l'universalité de la loi de la gravitation et les paramètres qui influencent la force gravitationnelle. Tous ceux ayant répondu ont trouvé la bonne réponse.

Concernant leur justification, certains ont mentionné la taille de la Lune, tandis que d'autres ont fait référence à sa masse. Bien que ces justifications ne prennent en compte qu'un seul des deux paramètres, elles indiquent néanmoins que ces élèves ont assimilé le concept de force d'interaction gravitationnelle et compris que le poids en est un cas particulier.

Pour enrichir cette évaluation, il serait pertinent d'ajouter une question de réflexion critique invitant les élèves à comparer la situation de l'ISS avec celle d'un autre objet, comme un satellite situé à une altitude plus élevée. Cela leur permettrait de transposer leurs connaissances à d'autres contextes et d'approfondir leur compréhension des phénomènes en jeu.

Par ailleurs, certaines erreurs récurrentes portent sur l'utilisation des unités et les conversions. L'intégration d'une question spécifique sur ce point permettrait de vérifier la maîtrise des unités et des ordres de grandeur, renforçant ainsi la rigueur scientifique des élèves.

Conclusion

Cette recherche a mis en évidence l'importance des notions d'espace et de temps comme piliers fondamentaux pour appréhender les phénomènes physiques. En mécanique, ces concepts constituent un socle essentiel sur lequel repose l'apprentissage des lois qui régissent le mouvement et les interactions dans les programmes actuels de physique-chimie.

L'un des rôles principaux de l'enseignant est d'identifier et de déconstruire les conceptions initiales des élèves, profondément ancrées dans leur perception intuitive du monde, afin de proposer des stratégies pédagogiques adaptées pour les déconstruire et les remplacer par des connaissances scientifiquement valides. En mécanique, de nombreuses conceptions initiales constituent des freins majeurs à l'apprentissage. En particulier, les idées préconçues liées à la notion de mouvement, souvent issues d'une compréhension partielle ou erronée des lois de Newton, conduisent les élèves à séparer les phénomènes terrestres des phénomènes extraterrestres. Cette vision restrictive limite le champ d'application des lois de la mécanique à ce que les élèves peuvent observer directement, créant une barrière cognitive qui complique l'assimilation de concepts plus complexes ou abstraits. Cette difficulté souligne l'importance de poser des bases solides pour les notions de mécanique, afin de permettre aux élèves d'élargir leur compréhension au-delà de leur perception immédiate.

Ce mémoire vise à concevoir une séquence pédagogique centrée sur la notion d'interaction gravitationnelle, destinée à une classe de 3^e. L'objectif principal est de remédier aux conceptions erronées et de démontrer que les lois de la mécanique, notamment celles de Newton, s'appliquent de manière universelle, tant dans le cadre terrestre qu'extraterrestre (hors mécanique quantique ou relativiste).

Lors de l'élaboration de cette séquence, nous avons cherché à répondre à ces enjeux en mobilisant des approches pédagogiques variées pour répondre aux besoins des élèves et favoriser une compréhension durable : l'évaluation diagnostique et formative pour identifier les conceptions initiales des élèves et suivre l'évolution de leurs apprentissages ; mais aussi l'évaluation sommative permettant de conclure sur l'efficacité de la démarche pédagogique et d'identifier des axes d'amélioration ; les tâches complexes incluant des problèmes ouverts ou des démarches d'investigation expérimentale, pour engager les élèves dans une réflexion active et structurée ou encore l'utilisation de l'histoire des sciences pour contextualiser les concepts et montrer leur construction progressive à travers le temps.

Après avoir mis en place cette séquence auprès d'une classe de 3^e, l'analyse des résultats s'inscrit dans une démarche de pratique réflexive, permettant d'évaluer l'impact de la séquence sur les conceptions des élèves et leur compréhension des notions étudiées, tout en mettant en lumière certains points d'amélioration, notamment la nécessité d'un

accompagnement renforcé pour certains élèves et d'une meilleure articulation entre les activités pratiques et les explications théoriques. Cette analyse critique nous a alors permis d'ajuster et d'affiner la séquence pour maximiser son efficacité pédagogique.

Ce travail met également en avant l'importance de continuer à explorer des dispositifs pédagogiques innovants, tels que les outils numériques interactifs ou les simulations, qui facilitent la visualisation des phénomènes abstraits. Ces technologies se révèlent particulièrement efficaces pour améliorer la compréhension et la représentation des mouvements en mécanique.

En définitive, cette recherche met en lumière le défi majeur que représente l'enseignement de la mécanique : amener les élèves à dépasser leur perception intuitive pour adopter une vision scientifique des phénomènes. En proposant une approche structurée et réflexive, ce mémoire contribue modestement à cet objectif, tout en ouvrant des pistes pour approfondir encore l'efficacité des dispositifs pédagogiques en physique-chimie.

Références bibliographiques

1. Niklas-Salminen A. Chapitre 1 : Le développement mental de l'enfant selon Jean Piaget. In: Création poétique chez l'enfant [Internet]. Aix-en-Provence: Presses universitaires de Provence; 1997 [cité 1 mai 2024]. p. 131-44. (Hors collection). Disponible sur: <https://books.openedition.org/pup/754>
2. Espace et lieu dans la pensée occidentale [Texte imprimé]: de Platon à Nietzsche. la Découverte; 2012.
3. Astolfi JP, Darot É, Ginsburger-Vogel Y, Toussaint J. Chapitre 15. Représentation (ou conception). In: Mots-clés de la didactique des sciences [Internet]. Louvain-la-Neuve: De Boeck Supérieur; 2008 [cité 1 mai 2024]. p. 147-57. (Pratiques pédagogiques; vol. 2e éd.). Disponible sur: <https://www.cairn.info/mots-cles-de-la-didactique-des-sciences--9782804157166-p-147.htm>
3. éducol | Ministère de l'Education Nationale et de la Jeunesse | Direction générale de l'enseignement scolaire [Internet]. [cité 9 mai 2024]. J'enseigne au cycle 3. Disponible sur: <https://eduscol.education.fr/87/j-enseigne-au-cycle-3>
4. éducol | Ministère de l'Education Nationale et de la Jeunesse | Direction générale de l'enseignement scolaire [Internet]. [cité 9 mai 2024]. J'enseigne au cycle 4. Disponible sur: <https://eduscol.education.fr/90/j-enseigne-au-cycle-4>
5. Réussir en mécanique du cycle 3 au cycle terminal du lycée : éducol | Ministère de l'Education Nationale et de la Jeunesse | Direction générale de l'enseignement scolaire [Internet]. [cité 1 mai 2024]. Recherche et innovation pour l'enseignement des sciences physiques. Disponible sur: <https://eduscol.education.fr/225/recherche-et-innovation-en-physique-chimie>
6. Rivier D, Brunner F. L'espace et le temps de la physique contemporaine. *Dialectica*. 1 janv 1993;47(2/3):269-85.
7. VIENNOT, L. (1989). Bilans des forces et loi des actions réciproques : analyse des difficultés des élèves et enjeux didactiques. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 716, pp. 951-971.
8. Laurence Viennot. Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire. Enseignement de la physique [physics.ed-ph]. Université Paris VII, 1977. Français. ffNNT : ff. fftel-01275119
9. Laboratoire de Didactique et d'Epistémologie des Sciences [Internet]. [cité 8 mai 2024]. Disponible sur : https://www.unige.ch/fapse/SSE/teachers/giordan/LDES/publi/rech/th_app.htm
10. Spagnou P. Les mystères du temps : de Galilée à Einstein. CNRS Éditions; 2017. (Le banquet scientifique).

11. Guy B. Les rapports entre les concepts d'espace, de temps et de mouvement doivent être repensés. Conséquences en physique (relativité). Discussion préliminaire. 1 janv 2006;
12. Le Bellac M. Les relativités : Espace, Temps, Gravitation [Internet]. EDP Sciences; 2015 [cité 10 oct 2023]. Disponible sur: <https://univ-scholarvox-com.ezproxy.unilim.fr/book/88827970>
13. Paty M. Les trois dimensions de l'espace et les quatre dimensions de l'espace-temps. HAL CCSD; 1998. 87 p. (Flament).
14. Bernard Guy. Eléments d'histoire des concepts d'espace et de temps : la place du mouvement, les glissements de sens. 2021. fahal-03442268f
15. Hawking SW. Une brève histoire du temps [Texte imprimé] : du Big Bang aux trous noirs. Flammarion ; 1989. (Souriau I. Nouvelle bibliothèque scientifique).
16. Guy B. Penser ensemble le temps et l'espace. *Philosophia Scientiæ*. 2011;15-3(3):91-113.
17. Correia M. Quels types de représentation peut-on observer chez les élèves de cycle 3 en ce qui concerne le volcanisme? Quels moyens mettre en place pour les faire évoluer?
18. Clément P. Sur la persistance d'une conception : la tuyauterie continue digestion-excrétion. *Aster : Recherches en didactique des sciences expérimentales*. 1991;13(1):133-56.
19. Maron V, Colin P. Une reconstruction de la théorie de la gravitation newtonienne : proposition d'une approche d'enseignement inspirée de l'histoire des idées. *RDST*. 31 déc 2017;
20. Zone proximale de développement. In: Wikipédia [Internet]. 2024 [cité 1 mai 2024]. Disponible sur : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Zone_proximale_de_d%C3%A9veloppement&oldid=212510992
21. Bachelard G. La formation de l'esprit scientifique : contribution à une psychanalyse de la connaissance objective. 11ème édition. Librairie philosophique J. Vrin; 1980. (Bibliothèque des textes philosophiques).
22. Les lois de Kepler [Internet]. 2020 [cité 20 déc 2024]. Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=LjY7PiTFp0c>
23. Chap 8 La gravitation [Internet]. 2019 [cité 20 déc 2024]. Disponible sur: <https://physiquechimiestbruno.wordpress.com/3eme/chap-9-la-gravitation/>
24. Galilée, G. (1638). Discours et démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles, Colin.
25. Newton I. Principia [Texte imprimé] : principes mathématiques de la philosophie naturelle. 2e tirage corrigé. Dunod; 2006.

26. <https://www.c-physique.fr/wp-content/uploads/2021/05/Brevet-Blanc-Janvier-2018.pdf>

Annexes

Annexe 1. Bulletins Officiels de l'Education Nationale (cycles 3 et 4).....	64
Annexe 1.1. Bulletin du cycle 3 (2023)	64
Annexe 1.2. Bulletin du cycle 4 (2020)	64
Annexe 2. Questionnaires « l'espace et le temps ».....	65
Annexe 2.1. Premier questionnaire.	65
Annexe 2.2. Second questionnaire.....	65
Annexe 3. Bulletin Officiel de l'Education Nationale (Terminale Spécialité 2019).....	66
Annexe 4. Bulletin Officiel de l'Education Nationale (Seconde générale et technologique 2019).	67
Annexe 5. Bulletin Officiel de l'Education Nationale (Terminale Spécialité 2019).....	68
Annexe 6. Questionnaire préalable.....	69
Annexe 7. Activité d'histoire des sciences n°1.	71
Annexe 8. Activité d'histoire des sciences n°1, adaptée aux élèves dyslexiques.	75
Annexe 9. Activité d'histoire des sciences n°1, version différenciée.....	81
Annexe 10. Activité d'histoire des sciences n°2.	85
Annexe 11. Activité expérimentale.....	87
Annexe 12. Support de cours (élève).....	90
Annexe 13. Support de cours (complet).....	94
Annexe 14. Evaluation formative.....	98
Annexe 15. Evaluation sommative.....	99

Annexe 1. Bulletins Officiels de l'Education Nationale (cycles 3 et 4)

Annexe 1.1. Bulletin du cycle 3 (2023)

Attendus de fin de cycle	
<ul style="list-style-type: none"> • Décrire un mouvement en précisant le point de vue. • Caractériser un mouvement par des mesures. 	
Connaissances et compétences attendues en fin de cours moyen	Connaissances et compétences attendues en fin de sixième
<p>Mouvements</p> <ul style="list-style-type: none"> • Observer et identifier le mouvement rectiligne ou circulaire d'un objet, en précisant le point de vue. • Mesurer une distance lors du déplacement d'un objet. • Mesurer une durée, comme intervalle entre deux instants, lors du déplacement d'un objet. • Effectuer des conversions d'unités de distance et de temps. 	<p>Mouvements</p> <ul style="list-style-type: none"> • Calculer la valeur de la vitesse à partir de la distance parcourue et de la durée de déplacement dans le cas du mouvement uniforme d'un objet par rapport à un observateur. • Observer et identifier des situations où la vitesse d'un objet en mouvement par rapport à un observateur a une valeur constante ou variable. • Effectuer des conversions d'unités de distance et de temps, en particulier dans le contexte du mouvement de révolution des planètes autour du Soleil. • Associer la durée d'une année au mouvement de révolution de la Terre autour du Soleil, du point de vue héliocentrique, et associer la durée d'un jour au mouvement de rotation de la Terre autour de l'axe des pôles.

Annexe 1.2. Bulletin du cycle 4 (2020)

Connaissances et compétences associées	Exemples de situations, d'activités et d'outils pour l'élève
Caractériser un mouvement	
<p>Caractériser le mouvement d'un objet.</p> <p>Utiliser la relation liant vitesse, distance et durée dans le cas d'un mouvement uniforme.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vitesse : direction, sens et valeur. - Mouvements rectilignes et circulaires. - Mouvements uniformes et mouvements dont la vitesse varie au cours du temps en direction ou en valeur. - Relativité du mouvement dans des cas simples. 	<p>L'ensemble des notions de cette partie peut être abordé à partir d'expériences simples réalisables en classe, de la vie courante ou de documents numériques.</p> <p>Utiliser des animations des trajectoires des planètes, qu'on peut considérer dans un premier modèle simplifié comme circulaires et parcourues à vitesse constante.</p> <p>Comprendre la relativité des mouvements dans des cas simples (train qui démarre le long d'un quai) et appréhender la notion d'observateur immobile ou en mouvement.</p>

Annexe 2. Questionnaires « l'espace et le temps ».

Annexe 2.1. Premier questionnaire.



L'espace et le temps



◆ Pour moi, l'espace c'est :

.....
.....
.....

◆ Pour moi, le temps c'est :

.....
.....
.....

Je suis en classe de :

Annexe 2.2. Second questionnaire.

Je suis en classe de : _____

◆ Proposez une définition de l'espace :

.....
.....
.....

◆ Proposez une définition du temps :

.....
.....
.....

Annexe 3. Bulletin Officiel de l'Education Nationale (Terminale Spécialité 2019).

Mouvement et interactions : relier les actions appliquées à un système à son mouvement.

<p>Mouvement dans un champ uniforme</p> <p>Mouvement dans un champ de pesanteur uniforme.</p> <p>Champ électrique créé par un condensateur plan.</p> <p>Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme.</p> <p>Principe de l'accélérateur linéaire de particules chargées.</p> <p>Aspects énergétiques.</p>	<p>Montrer que le mouvement dans un champ uniforme est plan.</p> <p>Établir et exploiter les équations horaires du mouvement.</p> <p>Établir l'équation de la trajectoire.</p> <p>Discuter de l'influence des grandeurs physiques sur les caractéristiques du champ électrique créé par un condensateur plan, son expression étant donnée.</p> <p>Décrire le principe d'un accélérateur linéaire de particules chargées.</p> <p>Exploiter la conservation de l'énergie mécanique ou le théorème de l'énergie cinétique dans le cas du mouvement dans un champ uniforme.</p> <p><i>Utiliser des capteurs ou une vidéo pour déterminer les équations horaires du mouvement du centre de masse d'un système dans un champ uniforme. Étudier l'évolution des énergies cinétique, potentielle et mécanique.</i></p> <p>Capacité numérique : Représenter, à partir de données expérimentales variées, l'évolution des grandeurs énergétiques d'un système en mouvement dans un champ uniforme à l'aide d'un langage de programmation ou d'un tableur.</p> <p>Capacités mathématiques : Résoudre une équation différentielle, déterminer la primitive d'une fonction, utiliser la représentation paramétrique d'une courbe.</p>
<p>Mouvement dans un champ de gravitation</p> <p>Mouvement des satellites et des planètes. Orbite.</p> <p>Lois de Kepler.</p> <p>Période de révolution.</p> <p>Satellite géostationnaire.</p>	<p>Déterminer les caractéristiques des vecteurs vitesse et accélération du centre de masse d'un système en mouvement circulaire dans un champ de gravitation newtonien.</p> <p>Établir et exploiter la troisième loi de Kepler dans le cas du mouvement circulaire.</p> <p>Capacité numérique : Exploiter, à l'aide d'un langage de programmation, des données astronomiques ou satellitaires pour tester les deuxième et troisième lois de Kepler.</p>

Annexe 4. Bulletin Officiel de l'Education Nationale (Seconde générale et technologique 2019).

Mouvement et interactions : Principe d'inertie.

3. Principe d'inertie	
Modèle du point matériel. Principe d'inertie. Cas de situations d'immobilité et de mouvements rectilignes uniformes. Cas de la chute libre à une dimension.	Exploiter le principe d'inertie ou sa contraposée pour en déduire des informations soit sur la nature du mouvement d'un système modélisé par un point matériel, soit sur les forces. Relier la variation entre deux instants voisins du vecteur vitesse d'un système modélisé par un point matériel à l'existence d'actions extérieures modélisées par des forces dont la somme est non nulle, en particulier dans le cas d'un mouvement de chute libre à une dimension (avec ou sans vitesse initiale).

Annexe 5. Bulletin Officiel de l'Education Nationale (Terminale Spécialité 2019).

Préambule : repères pour l'enseignement.

Repères pour l'enseignement

Le professeur est invité à :

- privilégier la mise en activité des élèves en évitant tout dogmatisme ;
- permettre et encadrer l'expression des conceptions initiales ;
- valoriser **l'approche expérimentale** ;
- contextualiser les apprentissages pour leur donner du sens ;
- procéder régulièrement à des **synthèses** pour expliciter et structurer les savoirs et savoir-faire et les appliquer dans des contextes différents ;
- tisser des liens aussi bien entre les notions du programme qu'avec les autres enseignements notamment les mathématiques, les sciences de la vie et de la Terre et l'enseignement « Sciences numériques et technologie » ;
- favoriser l'acquisition d'automatismes et développer l'autonomie des élèves en proposant des temps de travail personnel ou en groupe, dans et hors la classe.

Dès qu'elle est possible, une mise en perspective des savoirs avec **l'histoire des sciences** et **l'actualité scientifique** est fortement recommandée.

Annexe 6. Questionnaire préalable.

Mouvement et interactions
Mécanique 2 : Les forces

3^e

Questionnaire préalable

Répondez aux questions suivantes à l'aide de vos connaissances :

1) Selon vous, quelle est la raison pour laquelle un objet tombe lorsqu'on le lâche ?

.....
.....
.....

2) Si vous laissez tomber simultanément deux boules de même forme mais de masses différentes depuis la même hauteur, laquelle atteindra le sol en premier, et pourquoi ?

.....
.....
.....

3) Si vous laissez tomber simultanément une balle et une feuille de papier depuis la même hauteur, quel objet touchera le sol en premier ? Pourquoi ?

.....
.....
.....

4) D'après vous, pourquoi les planètes tournent autour du Soleil ?

.....
.....
.....

1

5) Pensez-vous qu'une force peut s'exercer entre deux objets sans contact direct ? Si oui, pouvez-vous donner un exemple ?

.....
.....
.....

6) Selon vous, pourquoi ressentez-vous votre poids lorsque vous êtes debout sur Terre ?

.....
.....
.....

7) Votre poids serait-il différent sur la Lune ? Pourquoi ?

.....
.....
.....

8) Pensez-vous que les mêmes lois expliquent à la fois la chute des objets sur Terre et le mouvement de la Lune autour de la Terre ? Pourquoi ?

.....
.....
.....

Annexe 7. Activité d'histoire des sciences n°1.

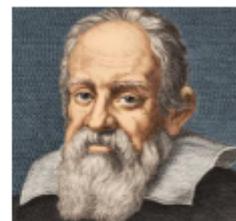
Mouvement et interactions

3^e

Mécanique 2 : Les forces, activité 2

Activité 2 : De la chute des corps au mouvement des planètes

Galileo Galilei, connu en français sous le nom de Galilée (1564-1642), était un mathématicien et physicien italien. Célèbre pour ses travaux d'astronomie, d'algèbre ou encore pour le perfectionnement de la lunette astronomique, nous nous intéressons ici à ses travaux sur **la chute des corps sur Terre**.



Le *Discours de Galilée* (*Discours et démonstrations mathématiques concernant deux nouvelles sciences*), publié en 1638, est une œuvre rassemblant les idées majeures de Galilée sur la mécanique et la structure des matériaux. Le récit est rédigé sous la forme d'un dialogue entre trois protagonistes : Salviati (représentant les idées de Galilée), Simplicio (défendant la pensée d'Aristote) et Sagredo (personnage alimentant le dialogue par sa nature curieuse). Le dialogue est réparti en quatre journées abordant différentes questions physiques que Galilée souhaite résoudre. Voici un extrait de la première journée du discours :

Simplicio : « Aristote s'élève contre certains anciens qui introduisaient le vide à cause du mouvement, disant que celui-ci ne pourrait avoir lieu sans celui-là. S'opposant à cette thèse, Aristote démontre que, tout au contraire, la réalité du mouvement rend le vide impossible [...] des mobiles de poids différents se meuvent dans le même milieu avec des vitesses inégales ayant entre elles même proportion que le poids [...] les vitesses du même mobile dans différents milieux sont inversement proportionnelles à la densité de ces milieux [...] un mobile devrait dans le vide se mouvoir instantanément ; or le mouvement instantané est impossible, donc on ne peut introduire le vide à cause du mouvement.

Salviati : [...] Je doute qu'Aristote ait jamais vérifié expérimentalement s'il est vrai que deux pierres, dont l'une est dix fois plus pesante que l'autre et qu'on laisse tomber au même instant d'une hauteur de cent coudées, par exemple, aient des vitesses si différentes que la plus grande touche déjà terre alors que l'autre n'a même pas descendu dix coudées.

1

Simplicio : On voit pourtant d'après ses propres paroles qu'il a fait l'expérience...

Sagredo : Mais moi qui en ai fait l'essai, seigneur Simplicio, je vous assure qu'un boulet d'artillerie pesant cent ou deux cents livres, ou même davantage, ne précédera même pas d'une palme, en touchant terre, une balle de mousquet dont le poids n'excède pas une demi-livre, et cela après une chute commune de cent coudées.

Salviati : Nous nous proposons de rechercher ce qui arriverait à des mobiles de poids très différents dans un milieu dont la résistance serait nulle... et si nous trouvons qu'effectivement des mobiles de poids spécifiques variables ont des vitesses de moins en moins différentes selon que les milieux sont de plus en plus aisés à pénétrer, qu'en fin de compte dans le milieu le plus ténu bien que non vide, et pour des poids très inégaux, l'écart des vitesses est très petit et presque insensible, alors nous pourrions admettre, me semble-t-il avec une très grande probabilité, que dans le vide les vitesses seraient toutes égales. [...]

Salviati : Si fluide, si ténu et si tranquille que soit le milieu, il s'oppose en effet au mouvement qui le traverse avec une résistance dont la grandeur dépend directement de la rapidité avec laquelle il doit s'ouvrir pour céder le passage au mobile ; et comme celui-ci par nature va en accélérant continuellement, il rencontre de la part du milieu une résistance sans cesse croissante, d'où résulte un ralentissement... si bien que la vitesse d'une part, la résistance de ce milieu de l'autre atteignent à une grandeur où, s'équilibrant l'une l'autre, toute accélération est empêchée, et le mobile réduit à un mouvement régulier et uniforme qu'il conserve constamment par la suite. »

1) Reformulez l'idée développée par Aristote : « des mobiles de poids différents se meuvent dans le même milieu avec des vitesses inégales ayant entre elles même proportion que le poids ».

.....
.....
.....

2) L'idée de Sagredo est-elle en accord avec celle proposée par Aristote ? Pourquoi ?

.....
.....

3) Dans l'avant-dernier paragraphe, Salviati propose d'étudier le mouvement de différents mobiles « dans un milieu dont la résistance serait nulle » contrairement à l'expérience menée par Sagredo. D'après vous, à quoi est due cette résistance dans l'expérience de Sagredo ?

.....
.....

4) Expérience : lâchez simultanément deux boules, de même forme et taille mais de masses différentes, depuis la même hauteur. Notez vos observations.

.....
.....
.....

5) Reproduisez l'expérience avec un boule et une feuille de papier. Notez vos observations et proposez une explication.

.....
.....
.....

6) Dans le dernier paragraphe de Salviati, ce dernier explique qu'au cours de la chute d'un objet, la force responsable de la chute de l'objet et celle responsable de son ralentissement finissent par se compenser. Quelle est la conséquence sur le mouvement de l'objet ?

.....
.....
.....

→ Cette idée a servi de fondation essentielle pour les travaux de **Newton** et la formulation de ses lois du mouvement.

Nous venons de voir que Galilée est l'un des premiers à avoir étudié la chute des corps sur Terre : **Les lois qui régissent la chute des corps sur Terre sont-elles valables pour expliquer le mouvement des planètes ?**

Mécanique 2 : Les forces, activité 2

C'est à Johannes Kepler (1571-1630), astronome allemand, que nous devons la découverte des relations mathématiques qui régissent le **mouvement des planètes** (entre 1609 et 1619).

Visionnez la vidéo suivante : « Les lois de Kepler » puis répondez aux questions.

<https://www.youtube.com/watch?v=LjY7PITFp0c&t=186s>



- 1) Dans notre Univers, qu'est-ce qui « force les objets à orbiter les uns autour des autres » ?
 - Le Soleil
 - La gravité
 - Les planètes
- 2) A quoi servent les trois lois de Kepler ?



- 3) D'après la seconde loi de Kepler : comment varie la vitesse de révolution d'une planète en fonction de sa distance au Soleil ?
 - La vitesse augmente lorsque la planète s'éloigne du Soleil.
 - La vitesse augmente lorsque la planète se rapproche du Soleil.
 - La vitesse est constante sur toute la trajectoire.
- ➔ La chute des corps et le mouvement des planètes obéissent à des lois bien définies, régies par des forces. C'est **Isaac Newton** qui s'est efforcé d'expliquer comment ces forces pouvaient agir à distance, aussi bien sur Terre que dans l'espace.



En 1665, Isaac Newton (1643-1727), physicien et mathématicien anglais, propose sa théorie de la **gravitation**. Selon la légende, il étudiait assis sous un arbre lorsqu'il vit une pomme tomber sur le sol. Il conclut alors qu'il devait exister une force qui attirait la pomme vers la Terre et qu'il en était de même pour tous les corps entre eux.

Annexe 8. Activité d'histoire des sciences n°1, adaptée aux élèves dyslexiques.

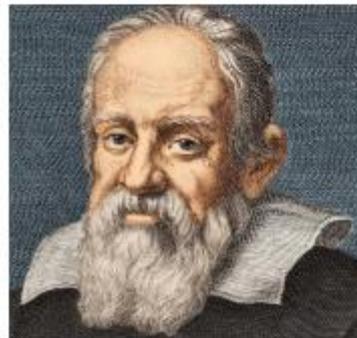
Mouvement et interactions

3^e

Mécanique 2 : Les forces, activité 2

Activité 2 : De la chute des corps au mouvement des planètes

Galileo Galilei, connu en français sous le nom de Galilée (1564-1642), était un mathématicien et physicien italien. Célèbre pour ses travaux d'astronomie, d'algèbre ou encore pour le perfectionnement de la lunette astronomique, nous nous intéressons ici à ses travaux sur **la chute des corps sur Terre**.



Le Discours de Galilée (*Discours et démonstrations mathématiques concernant deux nouvelles sciences*), publié en 1638, est une œuvre rassemblant les idées majeures de Galilée sur la mécanique et la structure des matériaux. Le récit est rédigé sous la forme d'un dialogue entre trois protagonistes : Salviati (représentant les idées de Galilée), Simplicio (défendant la pensée d'Aristote) et Sagredo (personnage alimentant le dialogue par sa nature curieuse). Le dialogue est réparti en quatre journées abordant différentes questions physiques que Galilée souhaite résoudre.

Consigne : Lisez l'extrait du Discours de Galilée et répondez aux questions.

1

Extrait : *Discours et démonstrations mathématiques concernant deux nouvelles sciences*

Simplicio : « Aristote s'élève contre certains anciens qui introduisaient le vide à cause du mouvement, disant que celui-ci ne pourrait avoir lieu sans celui-là. S'opposant à cette thèse, Aristote démontre que, tout au contraire, la réalité du mouvement rend le vide impossible [...] des mobiles de poids différents se meuvent dans le même milieu avec des vitesses inégales ayant entre elles même proportion que le poids [...] les vitesses du même mobile dans différents milieux sont inversement proportionnelles à la densité de ces milieux [...] un mobile devrait dans le vide se mouvoir instantanément ; or le mouvement instantané est impossible, donc on ne peut introduire le vide à cause du mouvement.

Salviati : [...] Je doute qu'Aristote ait jamais vérifié expérimentalement s'il est vrai que deux pierres, dont l'une est dix fois plus pesante que l'autre et qu'on laisse tomber au même instant d'une hauteur de cent coudées, par exemple, aient des vitesses si différentes que la plus grande touche déjà terre alors que l'autre n'a même pas descendu dix coudées.

Simplicio : On voit pourtant d'après ses propres paroles qu'il a fait l'expérience...

Sagredo : Mais moi qui en ai fait l'essai, seigneur Simplicio, je vous assure qu'un boulet d'artillerie pesant cent ou deux cents livres, ou même davantage, ne précédera même pas d'une palme, en touchant terre, une balle de mousquet dont le poids n'excède pas une demi-livre, et cela après une chute commune de cent coudées.

Salviati : Nous nous proposons de rechercher ce qui arriverait à des mobiles de poids très différents dans un milieu dont la résistance serait nulle... et si nous trouvons qu'effectivement des mobiles de poids spécifiques variables ont des vitesses de moins en moins différentes selon que les milieux sont de plus en plus aisés à pénétrer, qu'en fin de compte dans le milieu le plus ténu bien que non vide, et pour des poids très inégaux, l'écart des vitesses est très petit et presque insensible, alors nous pourrions admettre, me semble-t-il avec une très grande probabilité, que dans le vide les vitesses seraient toutes égales. [...]

Salviati : Si fluide, si ténu et si tranquille que soit le milieu, il s'oppose en effet au mouvement qui le traverse avec une résistance dont la grandeur dépend directement de la rapidité avec laquelle il doit s'ouvrir pour céder le passage au mobile ; et comme celui-ci par nature va en accélérant continuellement, il rencontre de la part du milieu une résistance sans cesse croissante, d'où résulte un ralentissement... si bien que la vitesse d'une part, la résistance de ce milieu de l'autre atteignent à une grandeur où, s'équilibrant l'une l'autre, toute accélération est empêchée, et le mobile réduit à un mouvement régulier et uniforme qu'il conserve constamment par la suite. »

Mécanique 2 : Les forces, activité 2

1) Reformulez l'idée développée par Aristote : « des mobiles de poids différents se meuvent dans le même milieu avec des vitesses inégales ayant entre elles même proportion que le poids ».

.....
.....
.....

2) L'idée de Sagredo est-elle en accord avec celle proposée par Aristote ? Pourquoi ?

.....
.....

3) Dans l'avant-dernier paragraphe, Salviati propose d'étudier le mouvement de différents mobiles « dans un milieu dont la résistance serait nulle » contrairement à l'expérience menée par Sagredo. D'après vous, à quoi est due cette résistance dans l'expérience de Sagredo ?

.....
.....

4) Expérience : lâchez simultanément deux boules, de même forme et taille mais de masses différentes, depuis la même hauteur. Notez vos observations.

.....
.....
.....

5) Reproduisez l'expérience avec un boule et une feuille de papier. Notez vos observations et proposez une explication.

.....
.....
.....

Mécanique 2 : Les forces, activité 2

6) Dans le dernier paragraphe de Salviati, ce dernier explique qu'au cours de la chute d'un objet, la force responsable de la chute de l'objet et celle responsable de son ralentissement finissent par se compenser. Quelle est la conséquence sur le mouvement de l'objet ?

.....
.....
.....

→ Cette idée a servi de fondation essentielle pour les travaux de **Newton** et la formulation de ses lois du mouvement.

Nous venons de voir que Galilée est l'un des premiers à avoir étudié la chute des corps sur Terre :

Les lois qui régissent la chute des corps sur Terre sont-elles valables pour expliquer le mouvement des planètes ?

C'est à Johannes Kepler (1571-1630), astronome allemand, que nous devons la découverte des relations mathématiques qui régissent le **mouvement des planètes** (entre 1609 et 1619).

Consigne : Visionnez la vidéo suivante : « Les lois de Kepler » puis répondez aux questions.

<https://www.youtube.com/watch?v=LjY7PiTFp0c&t=186s>



Mécanique 2 : Les forces, activité 2

1) Dans notre Univers, qu'est-ce qui « force les objets à orbiter les uns autour des autres » ?

- Le Soleil
- La gravité
- Les planètes

2) A quoi servent les trois lois de Kepler ?

.....

.....

3) D'après la seconde loi de Kepler : comment varie la vitesse de révolution d'une planète en fonction de sa distance au Soleil ?

- La vitesse augmente lorsque la planète s'éloigne du Soleil.
- La vitesse augmente lorsque la planète se rapproche du Soleil.
- La vitesse est constante sur toute la trajectoire.

➔ La chute des corps et le mouvement des planètes obéissent à des lois bien définies, régies par des forces. C'est **Isaac Newton** qui s'est efforcé d'expliquer comment ces forces pouvaient agir à distance, aussi bien sur Terre que dans l'espace.

En 1665, Isaac Newton (1643-1727), physicien et mathématicien anglais, propose sa théorie de la **gravitation**. Selon la légende, il étudiait assis sous un arbre lorsqu'il vit une pomme tomber sur le sol. Il conclut alors qu'il devait exister une force qui attirait la pomme vers la Terre et qu'il en était de même pour tous les corps entre eux.



Annexe 9. Activité d'histoire des sciences n°1, version différenciée

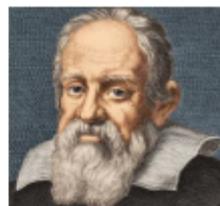
Mouvement et interactions

3^e

Mécanique 2 : Les forces, activité 2

Activité 2 : De la chute des corps au mouvement des planètes

Galileo Galilei, connu en français sous le nom de Galilée (1564-1642), était un mathématicien et physicien italien. Célèbre pour ses travaux d'astronomie, d'algèbre ou encore pour le perfectionnement de la lunette astronomique, nous nous intéressons ici à ses travaux sur **la chute des corps sur Terre**.



Le Discours de Galilée (*Discours et démonstrations mathématiques concernant deux nouvelles sciences*), publié en 1638, est une œuvre rassemblant les idées majeures de Galilée sur la mécanique et la structure des matériaux. Le récit est rédigé sous la forme d'un dialogue entre trois protagonistes : Salviati (représentant les idées de Galilée), Simplicio (défendant la pensée d'Aristote) et Sagredo (personnage alimentant le dialogue par sa nature curieuse). Le dialogue est réparti en quatre journées abordant différentes questions physiques que Galilée souhaite résoudre. Voici un extrait de la première journée du discours :

Simplicio : « Aristote s'élève contre certains anciens qui introduisaient le vide à cause du mouvement, disant que celui-ci ne pourrait avoir lieu sans celui-là. S'opposant à cette thèse, Aristote démontre que, tout au contraire, la réalité du mouvement rend le vide impossible [...] des mobiles de poids différents se meuvent dans le même milieu avec des vitesses inégales ayant entre elles même proportion que le poids [...] les vitesses du même mobile dans différents milieux sont inversement proportionnelles à la densité de ces milieux [...] un mobile devrait dans le vide se mouvoir instantanément ; or le mouvement instantané est impossible, donc on ne peut introduire le vide à cause du mouvement.

Salviati : [...] Je doute qu'Aristote ait jamais vérifié expérimentalement s'il est vrai que deux pierres, dont l'une est dix fois plus pesante que l'autre et qu'on laisse tomber au même instant d'une hauteur de cent coudées, par exemple, aient des vitesses si différentes que la plus grande touche déjà terre alors que l'autre n'a même pas descendu dix coudées.

1

Simplicio : On voit pourtant d'après ses propres paroles qu'il a fait l'expérience...

Sagredo : Mais moi qui en ai fait l'essai, seigneur Simplicio, je vous assure qu'un boulet d'artillerie pesant cent ou deux cents livres, ou même davantage, ne précédera même pas d'une palme, en touchant terre, une balle de mousquet dont le poids n'excède pas une demi-livre, et cela après une chute commune de cent coudées.

Salviati : Nous nous proposons de rechercher ce qui arriverait à des mobiles de poids très différents dans un milieu dont la résistance serait nulle... et si nous trouvons qu'effectivement des mobiles de poids spécifiques variables ont des vitesses de moins en moins différentes selon que les milieux sont de plus en plus aisés à pénétrer, qu'en fin de compte dans le milieu le plus ténu bien que non vide, et pour des poids très inégaux, l'écart des vitesses est très petit et presque insensible, alors nous pourrions admettre, me semble-t-il avec une très grande probabilité, que dans le vide les vitesses seraient toutes égales. [...]

Salviati : Si fluide, si ténu et si tranquille que soit le milieu, il s'oppose en effet au mouvement qui le traverse avec une résistance dont la grandeur dépend directement de la rapidité avec laquelle il doit s'ouvrir pour céder le passage au mobile ; et comme celui-ci par nature va en accélérant continuellement, il rencontre de la part du milieu une résistance sans cesse croissante, d'où résulte un ralentissement... si bien que la vitesse d'une part, la résistance de ce milieu de l'autre atteignent à une grandeur où, s'équilibrant l'une l'autre, toute accélération est empêchée, et le mobile réduit à un mouvement régulier et uniforme qu'il conserve constamment par la suite. »

1) Quelles sont les deux idées qui s'opposent dans ce texte ?

.....
.....
.....

2) Dans l'avant-dernier paragraphe, Salviati propose d'étudier le mouvement de différents mobiles « dans un milieu dont la résistance serait nulle » contrairement à l'expérience menée par Sagredo. D'après vous, à quoi est due cette résistance dans l'expérience de Sagredo ?

.....
.....

Mécanique 2 : Les forces, activité 2

- 3) Proposez et réalisez une expérience simple permettant de statuer sur ces deux hypothèses. Notez vos observations.

.....
.....
.....
.....
.....
.....

- 4) Reformulez, avec vos propres mots, l'idée développée par Salviati dans le dernier paragraphe.

.....
.....
.....
.....

→ Cette idée a servi de fondation essentielle pour les travaux de **Newton** et la formulation de ses lois du mouvement.

Nous venons de voir que Galilée est l'un des premiers à avoir étudié la chute des corps sur Terre : **Les lois qui régissent la chute des corps sur Terre sont-elles valables pour expliquer le mouvement des planètes ?**

C'est à Johannes Kepler (1571-1630), astronome allemand, que nous devons la découverte des relations mathématiques qui régissent le **mouvement des planètes** (entre 1609 et 1619).

Visionnez la vidéo suivante : « Les lois de Kepler » puis répondez aux questions.

<https://www.youtube.com/watch?v=LjY7PiTFp0c&t=186s>



Mécanique 2 : Les forces, activité 2

1) Dans notre Univers, qu'est-ce qui « force les objets à orbiter les uns autour des autres » ?

.....

2) Quel est le but des trois lois de Kepler ?

.....

.....

3) D'après la seconde loi de Kepler : comment varie la vitesse de révolution d'une planète en fonction de sa distance au Soleil ?

.....

.....

.....

→ La chute des corps et le mouvement des planètes obéissent à des lois bien définies, régies par des forces. C'est **Isaac Newton** qui s'est efforcé d'expliquer comment ces forces pouvaient agir à distance, aussi bien sur Terre que dans l'espace.



En 1665, Isaac Newton (1643-1727), physicien et mathématicien anglais, propose sa théorie de la **gravitation**. Selon la légende, il étudiait assis sous un arbre lorsqu'il vit une pomme tomber sur le sol. Il conclut alors qu'il devait exister une force qui attirait la pomme vers la Terre et qu'il en était de même pour tous les corps entre eux.

Annexe 10. Activité d'histoire des sciences n°2.

Mouvement et interactions

3^e

Mécanique 2 : Les forces, activité 3

Activité 3 : L'interaction gravitationnelle

En 1665, Isaac Newton (1643-1727), physicien et mathématicien anglais, propose sa théorie de la **gravitation**. Il expose sa théorie au sein de son œuvre « Principes mathématiques de la philosophie naturelle » publiée en 1687.



Partie 1 : Les lois du mouvement.

PREMIÈRE LOI

Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui, et ne le contraigne à changer d'état.

LOI II

Les changements qui arrivent dans le mouvement sont proportionnels à la force motrice, et se font dans la ligne droite dans laquelle cette force a été imprimée.

LOI III

L'action est toujours égale et opposée à la réaction ; c'est-à-dire, que les actions de deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales, et dans des directions contraires.

Consigne : A partir des extraits des « Principes mathématiques de la philosophie naturelle » ci-dessus, reformuler les trois lois de Newton sur le mouvement.

1) Première loi du mouvement ou « principe d'inertie » :

.....
.....

2) Deuxième loi du mouvement ou « principe fondamental de la dynamique » :

.....
.....

1

3) Troisième loi du mouvement ou « principe d'action-réaction » :

.....

.....

Partie 2 : L'interaction gravitationnelle.

L'interaction gravitationnelle, énoncée par Newton, est à l'origine de nombreux phénomènes observables, tels que la chute des corps vers la Terre ou le mouvement des objets dans l'espace.

L'interaction gravitationnelle correspond à la force d'attraction entre tous les objets ayant une masse. Voici deux extraits des « Principes mathématiques de la philosophie naturelle » :

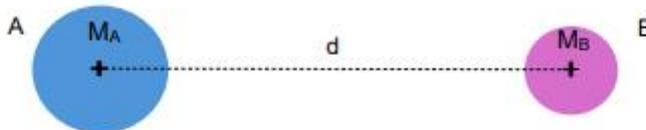
PROPOSITION VII – THÉORÈME VII

La gravité appartient à tous les corps, et elle est proportionnelle à la quantité de matière que chaque corps contient.

PROPOSITION VIII – THEOREME VIII

Si la matière de deux globes qui gravitent l'un vers l'autre est homogène à égales distances de leurs centres : le poids de l'un de ces globes vers l'autre sera réciproquement comme le carré de la distance qui est entre leurs centres.

Considérons deux globes A et B de masses M_A et M_B , séparés d'une distance d :



A partir des propositions VII et VIII, et de la situation énoncée ci-dessus, compléter l'expression de la force d'interaction gravitationnelle entre A et B :

$$F = G \times \frac{\dots \times \dots}{\dots}$$

G est la constante de gravitation universelle : $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$.

Annexe 11. Activité expérimentale.

Mouvement et interactions

3^e

Mécanique 2 : Les forces, TP

TP : La force de pesanteur

NOM : Prénom : Classe :

Domaine du socle		Compétences travaillées	I	F	S	TB
4	Pratiquer des démarches scientifiques	Proposer une ou des hypothèses pour répondre à une question scientifique. Concevoir une expérience pour la ou les tester.				
		Interpréter des résultats expérimentaux, en tirer des conclusions et les communiquer en argumentant.				
		Développer des modèles simples pour expliquer des faits d'observations et mettre en œuvre des démarches propres aux sciences.				
2	S'approprier des outils et des méthodes	Concevoir et réaliser un dispositif de mesure ou d'observation.				
1, 3	Pratiquer des langages	Réaliser / Utiliser un graphique				
		Utiliser la proportionnalité				

La **force de pesanteur** est une application particulière de l'interaction gravitationnelle. Il s'agit de la force d'interaction gravitationnelle exercée par la Terre sur un objet, possédant une masse, situé à sa surface : on l'appelle le **poids**.



Question préliminaire : Placer les éléments de la liste dans la bonne case.

Balance, force, Newton, kg, dynamomètre, N, quantité de matière, kilogramme

	Masse	Poids
Correspond à une ...		
Appareil de mesure		
Unité de mesure		
Symbole de l'unité		

1

Objectif de l'expérience : Déterminer la relation entre le poids et la masse.

Hypothèse :

Liste de matériel : Potence, dynamomètre, masses, élastiques.

Protocole :

Schéma légendé de l'expérience :

Résultats : Mesurer le poids de chacun de ces objets et compléter le tableau :

Masse m (g)	100	200	300	400	500
Masse m (kg)					
Poids P (N)					

Sur une feuille de papier millimétrée, tracer la courbe P en fonction de m.

Interprétation :

1) Quelle est l'allure de cette courbe ?

.....

2) Que pouvons-nous en déduire concernant les grandeurs poids et masse ?

.....
.....

3) Calculer le coefficient de proportionnalité, soit la pente de la droite, noté g .

.....
.....

4) Etablir la relation mathématique qui lie le poids et la masse. Rappeler les unités de chaque grandeur.

.....
.....
.....

Annexe 12. Support de cours (élève).

Mouvement et interactions

3^e

Mécanique 2 : Les forces

Mécanique 2 : Les forces



Une **action mécanique** d'un objet sur un autre est susceptible de **déformer** l'objet et/ou de **modifier son mouvement**. Lorsqu'un objet A exerce une action mécanique sur un objet B, B exerce une action mécanique sur A en retour. Il y a **interaction**.

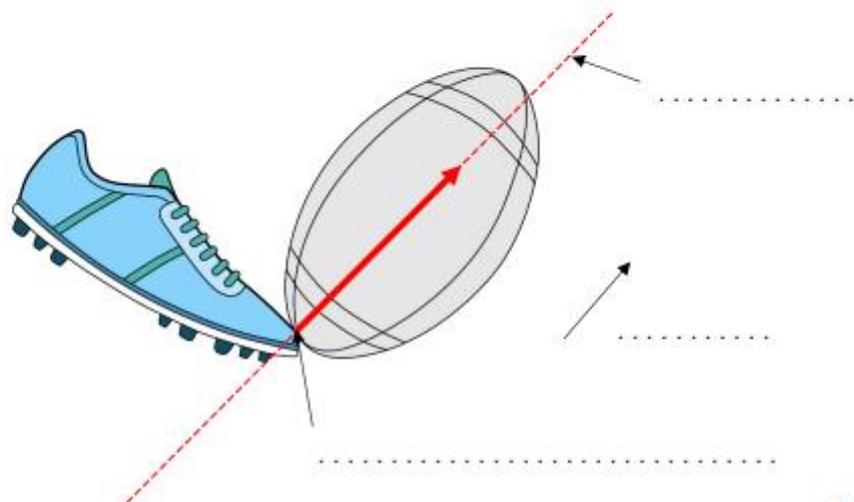
Comment décrire une interaction ?

I. Modéliser une action mécanique :

Activité 1 : De l'action à la force.

Bilan :

Pour représenter les interactions entre un système étudié et les objets qui l'entourent, on utilise un (DOI). Une action mécanique peut agir
..... ou d'un objet. Toute action mécanique est modélisée par une
ou plusieurs Une force est caractérisée par : un, une
..... (ou droite d'action), un et une
(valeur en Newton). Ces caractéristiques peuvent être représentées en traçant une flèche.



1

II. L'interaction gravitationnelle et la force de pesanteur :

Activités 2, 3, TP.

1) L'interaction gravitationnelle :

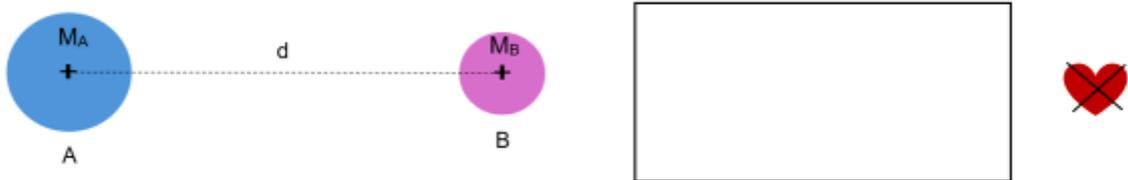
.....

.....

.....

.....

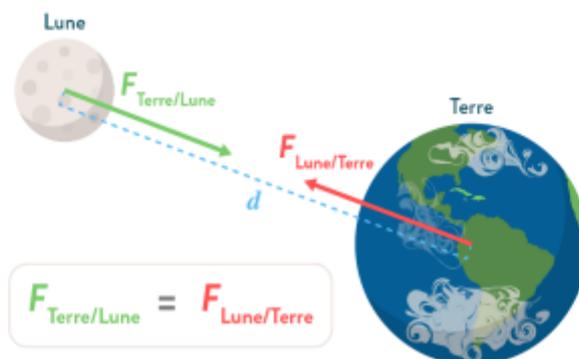
Considérons deux corps A et B de masses M_A et M_B , séparés d'une distance d :



Avec :

- F la force d'interaction gravitationnelle en Newton (N).
- G la constante de gravitation universelle : $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$.
- M_A et M_B les masses des corps A et B en kilogramme (kg).
- d la distance entre les deux corps en mètres (m).

Exemple : Interaction gravitationnelle entre la Terre et la Lune.



Mécanique 2 : Les forces

2) La force de pesanteur :

.....

.....

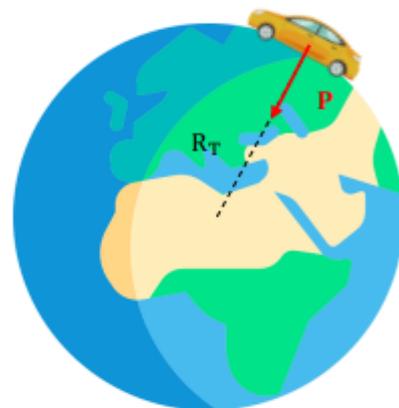
.....

.....

.....

Prenons l'exemple suivant :

Une voiture, de masse m , est positionnée à la surface de la Terre dont la masse est $M_T = 5,974 \cdot 10^{24} \text{ kg}$.



Le **poids**, noté P , de la voiture est caractérisé par :

- : droite reliant le centre de la Terre et celui de la voiture.
- : dirigé vers la Terre.
- : le centre de la voiture.

La distance séparant le centre de la voiture et celui de la Terre est ici égale au rayon de la Terre $R_T = 6378 \text{ km}$. Déterminer la force de pesanteur exercée par la Terre sur la voiture.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Mécanique 2 : Les forces

Notons $g = 9,80 \text{ N/kg}$ l'intensité de la pesanteur. L'expression devient :



La masse de la voiture est de **2 tonnes**. Calculer son poids à la surface de la Terre :

.....
.....

Notons que l'intensité de la pesanteur dépend de la distance entre le centre de l'objet et celui de la Terre. En effet : $g = \frac{G \times M_T}{d^2}$. L'intensité de la pesanteur, et par conséquent le poids, diminue à mesure que l'on s'éloigne du centre de la Terre.

Que vaut le poids de cette voiture à la surface de Saturne ?



Données : Masse de Saturne $M_S = 5,683 \times 10^{26} \text{ kg}$; Rayon de Saturne $R_S = 58\,232 \text{ km}$

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Annexe 13. Support de cours (complet).

Mécanique 2 : Les forces



Une **action mécanique** d'un objet sur un autre est susceptible de **déformer** l'objet et/ou de **modifier son mouvement**. Lorsqu'un objet A exerce une action mécanique sur un objet B, B exerce une action mécanique sur A en retour. Il y a **interaction**.

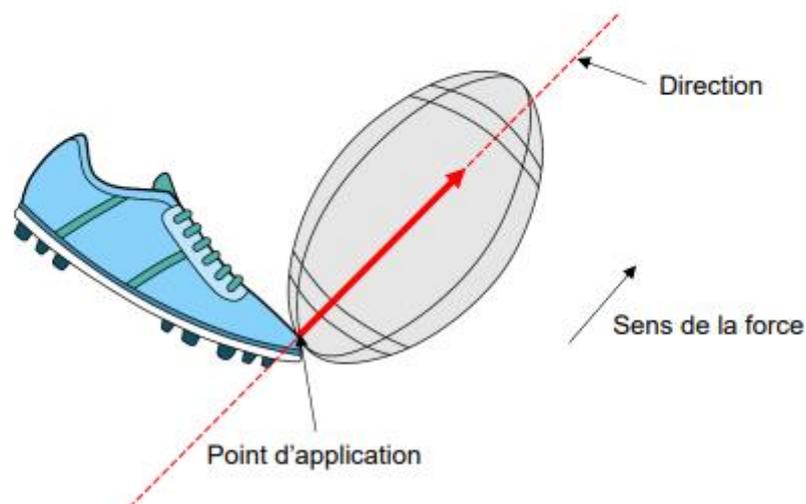
Comment décrire une interaction ?

I. Modéliser une action mécanique :

Activité 1 : De l'action à la force.

Bilan :

Pour représenter les **interactions** entre un système étudié et les objets qui l'entourent, on utilise un **diagramme objet-interactions** (DOI). Une action mécanique peut agir **à distance** ou au **contact** d'un objet. Toute action mécanique est **modélisée** par une ou plusieurs **forces**. Une force est caractérisée par : un **point d'application**, une **direction** (ou droite d'action), un **sens** et une **intensité** (valeur en Newton). Ces caractéristiques peuvent être représentées en traçant une flèche.



Mécanique 2 : Les forces

II. L'interaction gravitationnelle et la force de pesanteur :

Activités 2, 3, TP.

1) L'interaction gravitationnelle :

La **gravitation** est une **force attractive à distance** entre deux objets qui ont une **masse**. Ils exercent l'un sur l'autre une force de **même valeur**, de **même direction** mais de **sens opposé**. La gravitation gouverne tout l'Univers !

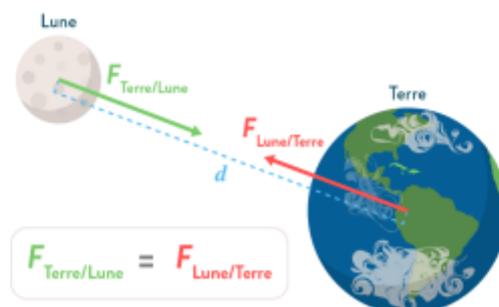
Considérons deux corps A et B de masses M_A et M_B , séparés d'une distance d :



Avec :

- F la force d'interaction gravitationnelle en Newton (N).
- G la constante de gravitation universelle : $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$.
- M_A et M_B les masses des corps A et B en kilogramme (kg).
- d la distance entre les deux corps en mètres (m).

Exemple : Interaction gravitationnelle entre la Terre et la Lune.



Mécanique 2 : Les forces

2) La force de pesanteur :

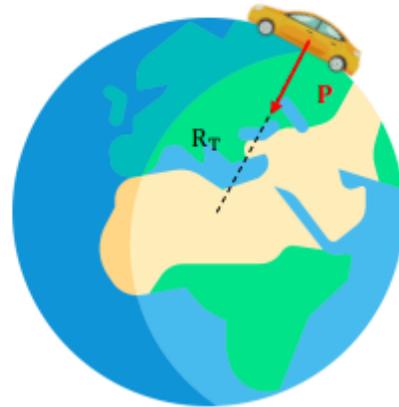
A la surface de la Terre, un corps de masse m est soumis à la gravitation. Le **pooids**, noté P , d'un objet situé au voisinage de la Terre est la **force** que la Terre exerce sur lui, résultant de la **gravitation**. La force de pesanteur est donc l'interaction gravitationnelle appliquée à un corps situé au voisinage de la Terre attiré par la Terre.

Prenons l'exemple suivant :

Une voiture, de masse m , est positionnée à la surface de la Terre de masse $M_T = 5,974 \times 10^{24}$ kg.

Le **pooids**, noté P , de la voiture est caractérisé par :

- Sa **direction** : droite reliant le centre de la Terre et celui de la voiture
- Son **sens** : dirigé vers la Terre
- Son **point d'application** : le centre de la voiture.



La distance séparant le centre de la voiture et celui de la Terre est ici égale au rayon de la Terre $R_T = 6378$ km. Déterminer la force de pesanteur exercée par la Terre sur la voiture.

$$\text{Force d'interaction gravitationnelle : } F = G \times \frac{M_A \times M_B}{d^2}$$

$$\text{Nous appliquons cette formule à la situation : } P = G \times \frac{M_T \times m}{R_T^2} = m \times \frac{G \times M_T}{R_T^2}$$

$$\text{Remplaçons par les valeurs numériques : } P = m \times \frac{6,67 \times 10^{-11} \times 5,974 \times 10^{24}}{(6378 \times 10^3)^2} = m \times 9,80$$

Mécanique 2 : Les forces

Notons $g = 9,80 \text{ N/kg}$ l'intensité de la pesanteur. On a alors :

$$\text{Newton (N)} \longrightarrow \boxed{P = m \times g} \longleftarrow \text{Newton par kilogramme (N/kg)}$$

Kilogramme (kg)



La masse de la voiture est de **2 tonnes**. Calculer son poids à la surface de la Terre :

$$P = m \times 9,80 = 2\,000 \times 9,80 = 19\,600 \text{ N}$$

Le poids de la voiture à la surface de la Terre est de 19 600 N.

Notons que l'intensité de la pesanteur dépend de la distance entre le centre de l'objet et celui de la Terre. En effet : $g = \frac{G \times M_T}{d^2}$. L'intensité de la pesanteur, et par conséquent le poids, diminue à mesure que l'on s'éloigne du centre de la Terre.

Que vaut le poids de cette voiture à la surface de Saturne ?



Données : Masse de Saturne $M_S = 5,683 \times 10^{26} \text{ kg}$; Rayon de Saturne $R_S = 58\,232 \text{ km}$

Force d'interaction gravitationnelle : $F = G \times \frac{M_A \times M_B}{d^2}$

Nous appliquons cette formule à la situation : $P = G \times \frac{M_S \times m}{R_S^2} = m \times \frac{G \times M_S}{R_S^2}$

Remplaçons par les valeurs numériques : $P = m \times \frac{6,67 \times 10^{-11} \times 5,683 \cdot 10^{26}}{(58\,232 \times 10^3)^2} = m \times 11,2$

$$P = m \times 11,2 = 2\,000 \times 11,2 = 22\,400 \text{ N}$$

A la surface de Saturne, le poids de la voiture vaut 22 400 N. L'intensité de la pesanteur est $g = 11,2 \text{ N/kg}$, elle est supérieure à celle calculer à la surface de la Terre et par conséquent, le poids aussi.

Exercices : 29, 30, 31 page 209 + 39 page 210 + 45, 49 page 211

4

Annexe 14. Evaluation formative.

Mouvement et interactions

3^e

Mécanique 2 : Les forces, exercice

VOYAGER 3

Situation : Vous êtes ingénieur pour la **NASA** (National Aeronautics and Space Administration) et travaillez sur la conception de **Voyager 3** qui doit survoler Neptune.



Le 25 août 1989, la sonde Voyager 2 a survolé Neptune à 4950 km du pôle Nord de la planète. La planète Neptune a un rayon de 24 622 km et une masse de $1,024 \times 10^{26}$ kg. Votre objectif est de faire survoler **Voyager 3** à **4 300 km** du pôle Nord de Neptune. Cette sonde est équipée d'un ensemble d'équipements. Un des bras métalliques est équipé :



- d'un spectromètre infrarouge,
- d'un spectromètre ultraviolet,
- d'un système d'imagerie polarimétrique,
- d'un système radio.

Dispositifs	Spectromètre infrarouge	Spectromètre ultraviolet	Système d'imagerie polarimétrique	Système radio
Masse (g)	1 128	1 354	1 352	511

Pendant les tests techniques au laboratoire, le bras a cédé sous une force de 38,3 Newton. Le bras supportera-t-il les instruments lors du passage à 4 300 km du pôle Nord de Neptune ?

Rappel :

Considérons deux objets A et B de masses M_A et M_B , dont les centres sont séparés d'une distance d . La valeur de la force d'interaction gravitationnelle s'exerçant entre A et B vaut :

$$F_{A/B} = F_{B/A} = G \times \frac{M_A \times M_B}{d^2}$$

G est la constante de gravitation universelle : $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$.

1

Annexe 15. Evaluation sommative.

3^e : Mouvement et interactions

Date :

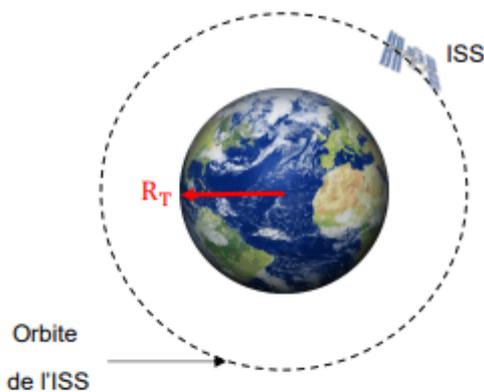
Evaluation

NOM : Prénom : Classe :

Domaine du socle		Compétences travaillées	I	F	S	TB
1,3	Pratiquer des langages	Réaliser / Utiliser un schéma.				
		Lire et comprendre des documents scientifiques.				
		Effectuer un calcul				
		Exprimer un résultat (grandeur et unité)				

MISSION ALPHA

La mission Alpha est la 2^e mission de l'astronaute français Thomas Pesquet à bord de la **Station Spatiale Internationale (ISS)**. Durant son séjour de 6 mois, dans le cadre des expéditions 64 et 65, il a eu l'occasion d'effectuer plus de 200 expériences scientifiques et de réaliser 4 sorties extravéhiculaires.



La structure métallique de l'ISS a une masse de **419 tonnes**. L'ISS est en orbite autour de la Terre, à une altitude de **360 kilomètres**.

Se déplaçant à la vitesse constante

v = 27 611 km/h, elle fait le tour de notre planète en **92 minutes** seulement.

Données :

- Rayon de la Terre : $R_T = 6\,378\text{ km}$

- Masse de la Terre $M_T = 5,97 \times 10^{24}\text{ kg}$

La force d'interaction gravitationnelle s'exerçant entre deux corps A et B a pour valeur :

$$F = G \times \frac{M_A \times M_B}{d^2}$$

- G la constante de gravitation universelle : $G = 6,67 \times 10^{-11}\text{ N.m}^2/\text{kg}^2$.
- M_A et M_B les masses des corps A et B en kilogramme (kg).
- d la distance entre les deux corps en mètres (m).

1

1) Quelle est la forme de la trajectoire de l'ISS par rapport au centre de la Terre ? /1

.....
.....

2) Pourquoi peut-on affirmer que le mouvement de l'ISS est uniforme ? /1

.....
.....

3) Quelle distance parcourt l'ISS pour faire le tour de la Terre ? /2

.....
.....
.....

4) Vérifier que la vitesse de déplacement de l'ISS autour de la Terre est bien $v = 27\ 611\ \text{km/h}$. /2

.....
.....
.....
.....

5) L'action exercée par la Terre sur l'ISS est-elle une action de contact ou une action à distance ? /1

.....
.....

6) Montrer que la valeur de la force gravitationnelle s'exerçant entre la Terre et l'ISS vaut environ $3,7 \times 10^6\ \text{N}$. /3

.....
.....
.....
.....

2

- 7) Sur le schéma suivant, représenter la force exercée par la Terre sur l'ISS (notée $F_{T/ISS}$) ainsi que celle exercée par l'ISS sur la Terre (notée $F_{ISS/T}$). /4



Echelle : 1 cm pour 1×10^6 N

- 8) Donner la formule reliant le poids P d'un objet, sa masse m et l'intensité de la pesanteur g .
Expliciter les unités. /2,5

.....

.....

.....

- 9) Sur Terre, $g = 9,81$ N/kg. Calculer le poids de l'ISS à la surface de la Terre. /2

.....

.....

.....

- 10) Le poids de l'ISS serait-il identique à la surface de la Lune ? Justifier. /1,5

.....

.....

.....

.....

.....

3

L'espace et le temps en Physique

Les notions d'espace et de temps sont fondamentales en physique et constituent des concepts complexes, tant d'un point de vue historique que didactique. Ce mémoire s'intéresse aux difficultés rencontrées par les élèves dans l'assimilation de ces notions et propose des stratégies pédagogiques visant à déconstruire leurs conceptions initiales erronées. L'étude débute par une analyse de l'évolution des définitions de l'espace et du temps à travers les travaux de penseurs majeurs, d'Aristote à Einstein. Les changements de paradigme influencent profondément l'enseignement de la mécanique. Les recherches menées en classe révèlent plusieurs conceptions erronées des élèves notamment la séparation entre l'espace terrestre et l'espace cosmique. Ces conceptions, souvent héritées de l'expérience quotidienne, constituent des obstacles à l'apprentissage des lois de Newton et de la gravitation universelle. Face à ces difficultés, ce mémoire propose plusieurs stratégies didactiques : l'utilisation de l'histoire des sciences pour contextualiser les théories, des évaluations diagnostiques et formatives pour identifier et suivre l'évolution des conceptions des élèves, ainsi que des tâches complexes favorisant la réflexion et la mise en situation. Une séquence pédagogique testée en classe de 3^e est détaillée, incluant des expériences et activités interactives visant à démontrer l'universalité des lois de la mécanique classique. L'analyse des résultats montre que ces approches peuvent être améliorées pour permettre aux élèves de mieux appréhender la gravitation et d'intégrer progressivement la vision newtonienne du mouvement. Cette étude souligne ainsi l'importance d'une démarche progressive et interactive pour surmonter les conceptions initiales et favoriser une compréhension scientifique rigoureuse de l'espace et du temps.

Mots-clés : Enseignement, Physique, Espace, Temps, Mécanique, Pédagogie, Conception Initiale, Force d'interaction gravitationnelle, Gravitation universelle

Space and time in Physics

The notions of space and time are fundamental in physics and are complex concepts from both a historical and didactic point of view. This dissertation looks at the difficulties encountered by students in assimilating these notions and proposes teaching strategies aimed at deconstructing their initial misconceptions. The study begins with an analysis of the evolution of the definitions of space and time through the work of major thinkers, from Aristotle to Einstein. Paradigm shifts have had a profound influence on the teaching of mechanics. Research carried out in the classroom has revealed several misconceptions among students, in particular the separation between terrestrial space and cosmic space. These conceptions, often inherited from everyday experience, are obstacles to learning Newton's laws and universal gravitation. Faced with these difficulties, this dissertation proposes a number of teaching strategies: the use of the history of science to contextualise the theories, diagnostic and formative assessments to identify and monitor changes in pupils' conceptions, and complex tasks that encourage reflection and role-playing. A teaching sequence tested in a 3^e class is detailed, including experiments and interactive activities aimed at demonstrating the universality of the laws of classical mechanics. An analysis of the results shows that these approaches can be improved upon. Analysis of the results shows that these approaches can be improved to enable pupils to gain a better understanding of gravitation and gradually integrate the Newtonian view of motion. This study highlights the importance of a progressive, interactive approach to overcoming initial conceptions and promoting a rigorous scientific understanding of space and time.

Keywords : Teaching, Physics, Space, Time, Mechanics, Pedagogy, Preconception, Gravitational Force, Universal Gravitation

